

ISSN 0104-1347

Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial¹

Reference evapotranspiration measured with a weighing lysimeter and estimated by Penman-Monteith (FAO-56) on a monthly and ten-days time scales

Alailson Venceslau Santiago², Antonio Roberto Pereira³, Marcos Vinicius Folegatti⁴ e Selma Regina Maggioletto⁵

Resumo - A evapotranspiração de referência (ET_0 , mm d^{-1}) foi medida por um lisímetro de pesagem acoplado a três células de carga, durante o ano de 1996, em Piracicaba, SP. A série temporal dos valores medidos diariamente foi agrupada em seqüências de 10 ou 30 dias, gerando conjuntos de valores médios representativos dessas duas escalas de tempo. Médias móveis com diversos passos foram usadas para aumentar o número de pontos nos conjuntos gerados e para verificar seus efeitos sobre as relações estatísticas. Estimativas de ET_0 médio correspondentes aos intervalos de tempo das médias medidas foram obtidas com a equação de Penman-Monteith seguindo-se as parametrizações e procedimentos descritos no boletim FAO-56, usando dados meteorológicos de uma estação automatizada situada próxima ao lisímetro. A análise de regressão linear simples (Lisímetro = b Estimativa) mostrou as seguintes tendências estatísticas: 1) na escala de 30 dias, $Y = 1,0905 X \pm 0,212 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,9512$ de janeiro a junho; e $Y = 0,9622 X \pm 0,166 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,8249$ de agosto a novembro; 2) na escala de 10 dias, $Y = 1,0866 X \pm 0,332 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,9158$ de janeiro a junho; e $Y = 0,9573 X \pm 0,323 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,7729$ de agosto a novembro. Os diferentes passos não afetaram substancialmente o valor de b, mas, em geral, o erro médio da estimativa aumentou quando o passo aumentou, diminuindo o número de pontos comparados. Face às dificuldades de medir ET_0 em períodos chuvosos as relações obtidas no segundo período talvez expressem melhor o grau de ajuste das estimativas. A performance das estimativas não se alterou quando se substituiu o saldo de radiação medido por valor estimado usando os procedimentos FAO-56, simulando uma situação muito comum de ausência de medida desse elemento meteorológico.

Palavras-chave: lisimetria, evapotranspiração, saldo de radiação

Abstract - Reference evapotranspiration (ET_0 , mm d^{-1}) was measured by a weighing lysimeter coupled with three load cells, during 1996, in Piracicaba, SP, Brazil. The time series of measured ET_0 was pooled in sequences of either 10 or 30 days generating groups of mean values for such time scales. Moving averages with different steps were used to increase the number of points in each group and to test their effect on statistical relationships. Estimates of mean ET_0 corresponding to the time intervals of the measured averages were computed with the Penman-Monteith equation following the parameterizations and procedures described in the FAO Irrigation and Drainage Paper 56, using data given by an automatic meteorological weather station located close to the lysimeter. Simple linear regression analysis (Lysimeter = b Estimative) indicates the following statistical tendencies: 1) for the 30-days time scale, $Y = 1.0905 X \pm 0.212 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.9512$ from January to June; and $Y = 0.9622 X \pm 0.166 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.8249$ from August to November; 2) for the 10-days time scale, $Y = 1.0866 X \pm 0.332 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.9158$ from January to June; e $Y = 0.9573 X \pm 0.323 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.7729$ from August to November. The different time steps did not affect the b value; but, in general, as the time step increased so did the mean error of the estimative due to the decrease in the number of points compared. Due to the operational difficulties in measuring ET_0 during periods of high intensity rains perhaps the relationships found for the second period represent better the degree of fit of the estimates. The performance of the ET_0 estimates did not change substantially when the measured net radiation was substituted by an estimative using the FAO-56 guidelines, simulating a very common situation of lack of such meteorological variable.

Key words: lysimetry, evapotranspiration, net radiation

¹ Extraído da Dissertação de MS do primeiro autor

² CPG em Física do Ambiente Agrícola, ESALQ/USP; santiago@esalq.usp.br

³ Prof. Associado, LCE/ESALQ/USP. Caixa Postal 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. arpereir@carpa.ciagri.usp.br

⁴ Prof. Associado, LER/ESALQ/USP. Caixa Postal 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. mvfolega@carpa.ciagri.usp.br

⁵ Pesquisadora Visitante, LCE/ESALQ/USP. Caixa Postal 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. srmaggio@hotmail.com

Introdução

Os recursos hídricos estão cada vez mais escassos havendo iminente competição entre seu uso direto no cotidiano urbano e sua aplicação agrícola para gerar alimentos em áreas e épocas com deficiência de chuvas. Estima-se que mais de 50% da população mundial depende de produtos agrícolas irrigados (LIMA *et al.*, 1999). Tornou-se necessário o planejamento mais eficaz do aproveitamento da água na produção agrícola, com desenvolvimento de metodologias que permitam estimar volumes cada vez mais exatos de água necessária para obtenção de ótimas produções dos cultivos. Um ponto crucial é a quantificação correta da evapotranspiração dos cultivos.

Baseados no trabalho de ALLEN *et al.* (1989), um painel de especialistas da FAO (ALLEN *et al.*, 1998) recomendou a adoção do modelo de Penman-Monteith como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), mesmo para locais com deficiência de dados meteorológicos necessários ao seu uso, fornecendo procedimentos e parametrizações adequadas a diversas escalas de tempo (diária, decenal, e mensal). Aquele comitê solicitou que se fizessem testes em outras regiões para verificar a adequação de sua proposta. Tal solicitação foi parcialmente atendida visto que são inúmeros os testes realizados em condições brasileiras, mas apenas na escala diária de medida e estimativa (PEREIRA, 1998; SENTELHAS *et al.*, 1998; SOUZA *et al.*, 1998). Foi encontrado apenas o relato de PERES *et al.* (1995) em que foram utilizadas as escalas decenal e mensal de estimativa de ET_o pelo método de Penman-Monteith, mas utilizando medidas de lisímetros de drenagem que não permitem medidas em escala diária, e somente com estimativas do saldo de radiação segundo OMETTO (p66, 1981).

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo estudar o desempenho do modelo de Penman-Monteith, seguindo as parametrizações propostas pelo Boletim FAO-56 (ALLEN, 1998) para estimativa da ET_o nas escalas decenal e mensal, comparando-as com medidas em lisímetro de pesagem automática, que permite medida em escala até menor que a diária, sendo mais preciso e eficiente que o lisímetro de drenagem utilizado por PERES *et al.* (1995). Objetivou-se também verificar o efeito de se usar as parametrizações indicadas para estimativa do saldo de radiação simulando a situação de locais e épocas com dados meteorológicos incompletos. Ava-

liações nessas escalas de tempo não são frequentes, mas elas são importantes em estudos agroclimáticos visando estimativas de quebra de safra (DOORENBOS & KASSAM, 1994), em planejamento de viabilidade de sistemas de irrigação, e em manejo de irrigação de culturas perenes.

Material e métodos

As medidas a campo foram realizadas durante 1996 numa área de 3150m² (35 x 90m), da Fazenda Areão, ESALQ/USP, em Piracicaba, SP (22°42'S; 47°30'W; 546m de altitude média). O solo foi classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com declividade média de 2,3%, e vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé) mantida com altura média de 0,12m por meio de cortes para simular as condições de superfície de referência. A ET_o foi medida com um lisímetro de pesagem (1,20 x 0,85 x 0,65m), descrito em SILVA *et al.* (1999), com três células de carga em forma de S (Omega Engineering, model LCCA-2K) e o sinal armazenado por um datalogger (CR10, Campbell Scientific, Inc.). Os valores obtidos a cada segundo geravam médias a cada 30min, como sugerido por BERGAMASCHI *et al.* (1997), suavizando-se as variações instantâneas causadas por abalos impostos pelo atrito do vento com a vegetação. Os cortes da grama dentro do lisímetro foram manuais com tesoura, e com cortador de grama na área fora do lisímetro. Irrigações frequentes foram feitas com um sistema sub-superficial na área circundante ao lisímetro para se obter condições compatíveis com a definição de ET_o. Dentro do lisímetro a irrigação foi manual com regador e sempre na mesma data da irrigação externa.

Os elementos meteorológicos necessários para a estimativa de ET_o (i.e., saldo de radiação, temperatura e umidade do ar, e velocidade do vento) foram coletados por uma estação automatizada instalada na área experimental. Os sensores foram conectados a um datalogger (CR10, Campbell Scientific, Inc.), que armazenou valores médios a cada 30min, a partir de medidas obtidas a cada segundo.

Segundo as parametrizações propostas pelo boletim FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), a equação original de Penman-Monteith assume a seguinte forma para a evapotranspiração de referência (ET_o, mm d⁻¹):

$$ET_o = \frac{0,408 \ s (R_n - G) + g \frac{900}{T_{med} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + g(1 + 0,34 \ u_2)} \quad (1)$$

sendo: R_n o saldo de radiação total diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T_{med} a temperatura média diária do ar a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$); U_2 a velocidade do vento média diária a 2m de altura (m s^{-1}); e_s a pressão de saturação do vapor média diária (kPa); e_a a pressão parcial de vapor média diária (kPa); s a declividade da curva de pressão de saturação de vapor no ponto de T_{med} ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). O coeficiente γ foi feito constante e igual a $0,0633 \text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, pois a pressão atmosférica no local variou muito pouco ao longo do ano ($95,03 \text{kPa}$ em Janeiro, e $95,7 \text{kPa}$ em Julho), e o calor latente de evaporação da água é fracamente afetado pela temperatura sendo recomendado um valor médio igual a $2,45 \text{MJ kg}^{-1}$.

A temperatura média diária (T_{med}) deve ser calculada em função das temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) diárias como:

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

mesmo em situações em que medidas horárias (ou mais freqüentes) sejam disponíveis. Essa regra serve também para as escalas de tempo maiores que um dia. Para decêndios ou meses utiliza-se a soma dos valores médios diários dividindo-se pelo número de dias do período.

A declividade da curva da pressão de saturação de vapor (s , $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) em função da temperatura no ponto de T_{med} é definida como:

$$s = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 \ T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (3)$$

A média diária do déficit de saturação de vapor d'água no ar ($e_s - e_a$), foi calculada a partir das temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) e das umidades relativas máxima (UR_{max}) e mínima (UR_{min}) diárias, ou seja:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{min})UR_{max} + e^{\circ}(T_{max})UR_{min}}{200} \quad (5)$$

sendo $e^{\circ}(T)$, a pressão de saturação de vapor, definida por

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 \ T}{T + 237,3} \right] \quad (6)$$

sendo que na eq. (6), substitui-se T por T_{max} ou T_{min} , para se obter $e^{\circ}(T_{max})$ e $e^{\circ}(T_{min})$.

Para períodos de 10 dias ALLEN (1998) também recomenda $G = 0$, mas na escala mensal, o seu cálculo deve obedecer a seguinte expressão:

$$G_{mês,i} = 0,07 (T_{mês,i+1} - T_{mês,i-1}) \quad (7)$$

Caso a $T_{mês,i+1}$ seja desconhecida, utiliza-se a seguinte Equação:

$$G_{mês,i} = 0,14 (T_{mês,i} - T_{mês,i-1}) \quad (8)$$

em que: $T_{mês,i}$ = média mensal da temperatura do ar para o mês i ($^{\circ}\text{C}$); $T_{mês,i-1}$ = média mensal da temperatura do ar do mês anterior a i ($^{\circ}\text{C}$); $T_{mês,i+1}$ = média mensal da temperatura do ar do mês posterior a i ($^{\circ}\text{C}$).

Medida rotineira de R_n tem sido problemática em virtude da fragilidade do sensor, que inclui uma cúpula de plástico que se polimeriza com os raios solares e se fragmenta, causando erros sistemáticos nas medidas. Esse instrumento requer inspeção e troca freqüente da cúpula. Em postos agrometeorológicos a medida de R_n não é rotineira e, em sua ausência, o boletim FAO-56 recomenda que este elemento seja estimado pelas seguintes equações:

$$R_n = 0,77 R_s - (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) 4,903 \cdot 10^{-9}$$

$$\left(\frac{T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4}{2} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

$$R_{so} = R_a (a + b) \quad (11)$$

$$R_a = 37,586 \cdot d_r (w_s \sin f \sin d + \cos f \cos d \sin w_s) \quad (12)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2pJ}{365} \right) \quad (13)$$

$$d = 0,4093 \sin \left(\frac{2pJ}{365} - 1,405 \right) \quad (14)$$

$$w_s = \cos^{-1} (-\tan f \tan d) \quad (15)$$

$$N = \frac{24w_s}{p} \quad (16)$$

em que: R_s é o total diário de radiação solar incidente na superfície terrestre; R_a é o total diário de radiação solar extraterrestre; $a = 0,26$ e $b = 0,51$ são coeficientes locais (p31, OMETTO, 1981); n é o número de horas de brilho solar medido por heliógrafo (Campbell-Stokes, R. Fuess); N é a insolação máxima de cada dia, expressa em horas; R_{so} é o total diário de radiação solar incidente na superfície terrestre se $n = N$ naquele dia (céu limpo); d_r é a distância relativa Terra-Sol; f é a latitude local, igual a $-0,3962$ rad; d é a declinação solar, expressa em radianos; w_s é o ângulo horário do nascer do Sol, expresso em radianos; J é o dia Juliano; $T_{max,k}$ e $T_{min,k}$ representam as temperaturas máxima e mínima absolutas do período.

Antes de submeter os dados experimentais a uma análise estatística e comparativa eles foram tratados objetivando-se obter um conjunto de dados lisimétricos representativo da ETo local. Os problemas ocorreram em dias com chuvas muito intensas e também em seqüências de dias com chuvas intermitentes. O descarte desses dias fragmentou o ano em seqüências menores sendo possível selecionar um período de 151 dias antes (1º. período), e outro de 103 dias após (2º. período) o inverno. O período de

inverno mais intenso foi descartado em função da grama ter reduzido bastante seu crescimento, descaracterizando a condição de evapotranspiração de referência.

Em função da redução do número de dados disponíveis para comparações, definiu-se mês como sendo uma seqüência qualquer de 30 dias consecutivos, independentes da data de seu início. Isso permitiu multiplicar o número de “meses” possíveis numa seqüência temporal curta de dados, pois um “mês” passou a diferir do seguinte, no caso mais extremo, pela exclusão do primeiro dia da seqüência e a inclusão de um outro ao seu final. Essa técnica de média móvel permite que se altere o número de pontos excluídos (aqui definido como passo) na seqüência de 30 dias, gerando conjuntos de dados com passos diferentes. Desse modo, pôde-se analisar também o efeito de diferentes passos sobre as comparações entre valores medidos e estimados. Optou-se por trabalhar com conjuntos de dados gerados com passos iguais a 1, 5, 10, 15, e 30 dias. O caso de passo com 30 dias difere da convenção de mês por ele poder começar em qualquer dia do mês e não no dia primeiro, como no calendário em vigor. A mesma técnica de média móvel foi utilizada também na escala decendial, mas com passos iguais a 1, 2, 5, e 10 dias.

Após o tratamento dos dados, as médias dos valores medidos (Y) e estimados (X), nas duas escalas de tempo, foram comparadas e analisadas estatisticamente. Os gráficos de dispersão de pontos mostraram que a regressão linear simples ($Y = a + b X$) era suficiente para se avaliar a adequação das estimativas de ETo, calculando-se também o coeficiente de determinação (r^2) e o erro médio da estimativa, conforme sugerido por ALLEN et al. (1989). As comparações foram separadas em dois conjuntos, sendo uma para o período anterior ao inverno (1º. período, dias julianos 10 a 182, ou janeiro a junho), e outra dos dias após o inverno (2º. período, dias julianos 214 a 320, ou agosto a novembro), para verificar se houve efeito do repouso hibernal sobre a evapotranspiração do gramado e na performance do modelo.

Resultados e discussão

A variação sazonal da temperatura média diária do ar (T_{med}) do saldo de radiação, e da ETo durante o período experimental é mostrada na Figura 1A. No início do ano (1º. período, dias julianos 10 a 182), a T_{med} atingiu valor máximo próximo de 28°C

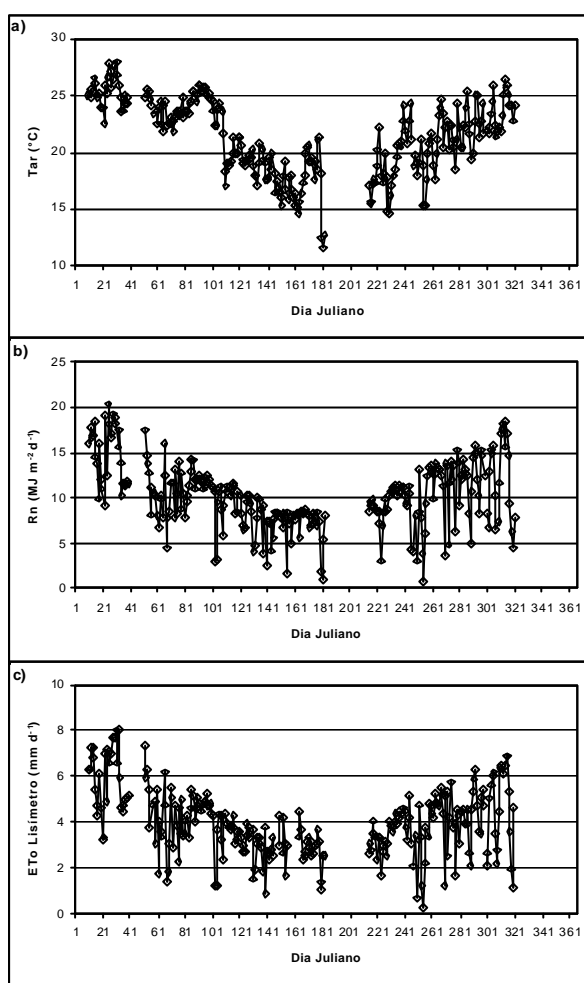


Figura 1 Variação sazonal da temperatura média (a), do saldo de radiação total diário (b), e da evapotranspiração de referência (Eto) medida (c), durante 1996, em Piracicaba, SP.

nos dias 25, 29 e 30, enquanto seu valor mínimo ($11,6^{\circ}\text{C}$) ocorreu no fim desse período (dia 181). Houve tendência de decréscimo do início ao fim do período com oscilações resultantes de passagens de massas frias pela região, enfatizadas pela queda brusca da T_{med} . Após o inverno, no segundo período (dias julianos 214 a 320), as temperaturas mais baixas ocorreram no início, com valor mínimo próximo de 15°C aumentando progressivamente até 26°C . As quedas bruscas, observadas em algumas seqüências de dias nos dois períodos, foram causadas por passagens de frentes frias.

Com relação ao saldo de radiação, sua tendência sazonal (Figura 1B) foi semelhante àquela observada e descrita para a T_{med} . No entanto, a varia-

ção de R_n foi mais acentuada (de 1 a $20\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) em virtude do maior efeito da nebulosidade sobre o balanço de radiação do que sobre a temperatura. No caso da temperatura, a nebulosidade atua no sentido de amenizar as variações.

Sendo a ETo resultante da interação dos elementos climáticos acima descritos, sua variação ao longo do ano seguiu a variação imposta pela disponibilidade de energia regional, que é ditada pelo ritmo de variação do saldo de radiação e da temperatura. No primeiro período o valor mínimo de ETo foi próximo a $1,0\text{mm d}^{-1}$ em vários dias, enquanto que o valor máximo foi igual a $8,0\text{mm d}^{-1}$ no final de janeiro. No segundo período, após o inverno, o valor mínimo foi próximo de 0mm d^{-1} , num dia com R_n desprezível e com alta umidade relativa do ar, e o valor máximo foi igual a $7,0\text{mm d}^{-1}$ (Figura 1C).

Antes de se discutir os resultados obtidos para as medidas e as estimativas de ETo é necessário que se enfatize a metodologia utilizada na definição das escalas de tempo (decendial e mensal), abordando suas vantagens e desvantagens. No caso da escala mensal, como havia apenas um ano de medidas lisimétricas, se fosse adotada a abordagem convencional, em que se considera o calendário para definir mês, apenas 12 valores seriam disponíveis para comparações. Considerando-se que, no período de inverno, a grama batatais não apresenta crescimento ativo, como requer a definição de ETo, o número de valores será menor ainda. Portanto, essa definição de mês restringe o número de pontos para comparações, sendo aqui considerada uma desvantagem.

Teoricamente, um modo de fazer melhor uso de uma série temporal curta de dados experimentais de difícil mensuração é a adoção de uma média móvel com diferentes passos (número de dias excluídos da seqüência anterior), aumentando-se o número de pontos para comparações. Desse modo, o mês ficou definido como o período de 30 dias consecutivos, independente da data de seu início. Por exemplo, um período contínuo de 40 dias de observações permite que se faça 11 conjuntos seqüenciais de 30 dias consecutivos, cada um com passo igual a 1 dia; ou seja, exclui-se o valor mais antigo e incorpora-se um mais novo. Essa abordagem tem a desvantagem de introduzir persistência nas médias de períodos longos em que a substituição de poucos pontos quase não altera seu valor médio. No entanto, uma das características da temperatura e do saldo de radiação é sua persistência ao longo do mês, com variações suaves na es-

cala mensal. Variações diárias bruscas, evidentes na Figura 1, são causadas por chuva ou por passagem de frente fria pelo local, tendo impacto mais significativo em escalas de tempo menores que 10 dias. FRÈRE & POPOV (1980), tratando de estimativa da evapotranspiração potencial, mostram que as variações diárias se moderam ao longo de 10 ou mais dias, enfatizando sua persistência. Estimativas de OMETTO (1991) mostram que as variações mensais da evapotranspiração potencial na região de Piracicaba, SP, não são grandes de um ano para outro. Portanto, a aparente desvantagem da média móvel coincide com a tendência natural de persistência do valor médio da evapotranspiração potencial em escala de tempo com 10 ou mais dias. Os resultados discutidos abaixo revelam que o uso dessa abordagem não introduziu viés nas relações estatísticas.

Verificou-se graficamente que as correlações entre valores medidos e estimados de ETo mostraram tendência de dispersão próxima à linha de valores iguais (1:1) podendo-se descartar o valor da interceptação da reta sem prejuízo nas análises. O modelo linear de comparação reduziu-se a $Y = bX$, forçando-se a passagem da reta pela origem ($a = 0$), sendo $Y =$ Valor medido e $X =$ Valor estimado semelhante à análise utilizada por ALLEN *et al.* (1989). Nesse caso, quanto mais próximo de 1,0 for o valor de b melhor será a estimativa. Os valores comparados representam as médias dos respectivos intervalos de tempo (decendial e mensal) e são expressos em mm d^{-1} .

A Tabela 1 resume a estatística das comparações executadas para a escala mensal (Figura 2). Não houve efeito significativo do número de pontos comparados sobre o coeficiente de regressão (b) tanto no primeiro como no segundo período, indicando que o uso da média móvel não introduziu viés nos resultados. O valor de b variou entre 1,0784 e 1,0961

resultando em b médio ponderado pelo número de pontos igual a 1,0905, indicando que o valor de ETo estimado pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56 subestimou em 9% as medidas lisimétricas no primeiro período. No segundo período a variação em b também foi pequena e esteve entre 0,9562 e 0,9664, com valor médio igual a 0,9622, representando superestimativa média inferior a 4%. Combinando-se os dois períodos a subestimativa foi cerca de 4%, indicando razoável correlação entre os valores medidos e estimados.

O erro médio da estimativa (e , mm d^{-1}) diminuiu à medida que aumentou o número de pontos comparados e variou entre 0,207 e 0,250 mm d^{-1} no primeiro período, e entre 0,149 e 0,297 mm d^{-1} no segundo período. No caso extremo, em que houve somente três pontos comparados (passo 30, mês convencional) no segundo período, o erro médio da estimativa aumentou em função de apenas um ponto discrepante (Figura 2d).

Com respeito ao grau de associação entre os valores estimados e medidos de ETo, o coeficiente de determinação (r^2) foi sempre maior para o primeiro período, embora as estimativas para o segundo período tenham sido mais próximas dos valores medidos. Os menores valores de r^2 no segundo período foram determinados pelo menor intervalo de variação de Y e X , sendo o caso extremo mostrado na Figura 2c e 2d. Esses resultados não diferiram daqueles relatados por ALLEN *et al.* (1989) para locais com clima úmido, ou seja, $b = 0,98$, $r^2 = 0,94$ e $e = 0,31 \text{ mm d}^{-1}$.

Seguindo os mesmos critérios de análise estatística utilizados na escala mensal, procedeu-se as comparações para a escala decendial, e seu resumo está na Tabela 2. A exemplo da escala mensal, também não houve efeito significativo do número de

Tabela 1. Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala mensal ($Y = bX$), durante 1996, em Piracicaba, SP.

Passo [†]	1º Período (dias 10 a 182)				2º Período (dias 214 a 320)			
	b	r^2	e^{\ddagger}	$n^{\#}$	b	r^2	e	n
1	1,0961	0,9476	0,207	122	0,9628	0,8507	0,149	76
5	1,0944	0,9500	0,212	25	0,9643	0,8235	0,176	16
10	1,0916	0,9497	0,224	13	0,9615	0,8063	0,197	8
15	1,0920	0,9521	0,235	9	0,9664	0,7254	0,242	6
30	1,0784	0,9566	0,250	5	0,9562	0,4289	0,297	3
Média	1,0905	0,9512	0,212	---	0,9622	0,8249	0,166	---

[†] n° de dias diferentes entre meses consecutivos; [‡] erro médio da estimativa (mm d^{-1}); [#] número de pontos comparados.

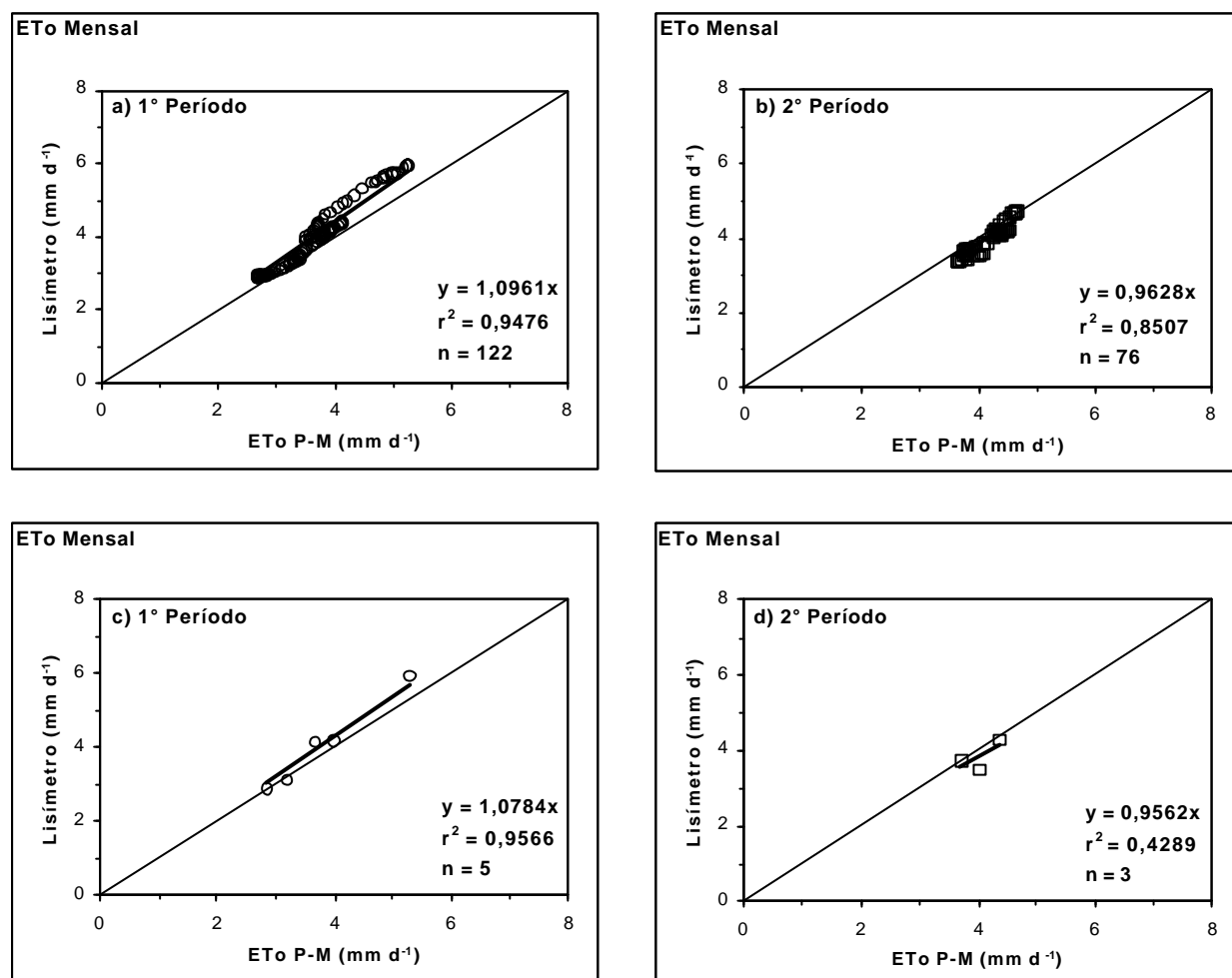


Figura 2. Relação entre a ETo medida (Lisímetro) e a estimada (P-M), na escala mensal, utilizando passo 1 (a e b) e passo 30 (c e d), para dois períodos de 1996 (1° período: janeiro a junho; 2° período: agosto a novembro), em Piracicaba, SP.

pontos comparados sobre o coeficiente de regressão (b), tanto no primeiro como no segundo período, mostrando que também nessa escala de tempo o uso da média móvel não alterou significativamente as comparações. O valor de b variou, no primeiro período,

entre 1,0855 e 1,0885 resultando em b médio ponderado pelo número de pontos igual a 1,0866, indicando que o valor de ETo estimado pelo modelo de Penman-Monteith (FAO-56) subestimou em 8%

Tabela 2. Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala decenal ($Y = bX$), durante 1996, em Piracicaba, SP.

Passo [†]	1° Período (dias 10 a 182)				2° Período (dias 214 a 320)			
	b	r ²	e [‡]	n [#]	b	r ²	E	n
1	1,0855	0,9149	0,330	142	0,9597	0,8615	0,264	96
2	1,0856	0,9159	0,331	71	0,9576	0,6164	0,443	49
5	1,0868	0,9147	0,338	29	0,9589	0,8207	0,300	20
10	1,0885	0,9180	0,342	15	0,9530	0,7931	0,350	10
Média	1,0866	0,9158	0,332	---	0,9573	0,7729	0,323	---

[†] n° de dias diferentes entre meses consecutivos; [‡] erro médio da estimativa (mm d⁻¹); [#] número de pontos comparados.

as medidas lisimétricas. No segundo período a variação em b também foi pequena e esteve entre 0,9530 e 0,9597, com valor médio igual a 0,9573, representando superestimativa média inferior a 5%. Combinando-se os dois períodos a subestimativa foi próxima a 3%, indicando razoável correlação entre os valores medidos e estimados.

A Figura 3 ilustra a correlação entre os valores da ETo medida pelo lisímetro e o estimado pelo modelo de Penman-Monteith (FAO-56) na escala decencial, utilizando o passo 1 e o passo 10 (convencional). O erro médio da estimativa variou entre 0,330 e 0,342 mm d^{-1} no primeiro período, com valor médio ponderado igual a 0,332 mm d^{-1} e entre 0,264 e

0,350 mm d^{-1} no segundo período e média ponderada de 0,323 mm d^{-1} . Novamente, o coeficiente de determinação (r^2) foi maior no primeiro período em função do maior intervalo de variação dos valores medidos e estimados, e este efeito pode ser também verificado na Figura 3c e 3d.

A condição de ausência de medida de R_n foi simulada procurando-se verificar a adequação da parametrização proposta no boletim FAO-56 (ALLEN, 1998) visando sua utilização tanto para outras épocas como para locais que não dispõem de medidas de R_n . Essa alternativa justifica-se também pelo fato dos atuais sensores de R_n apresentarem variação temporal em sua calibração.

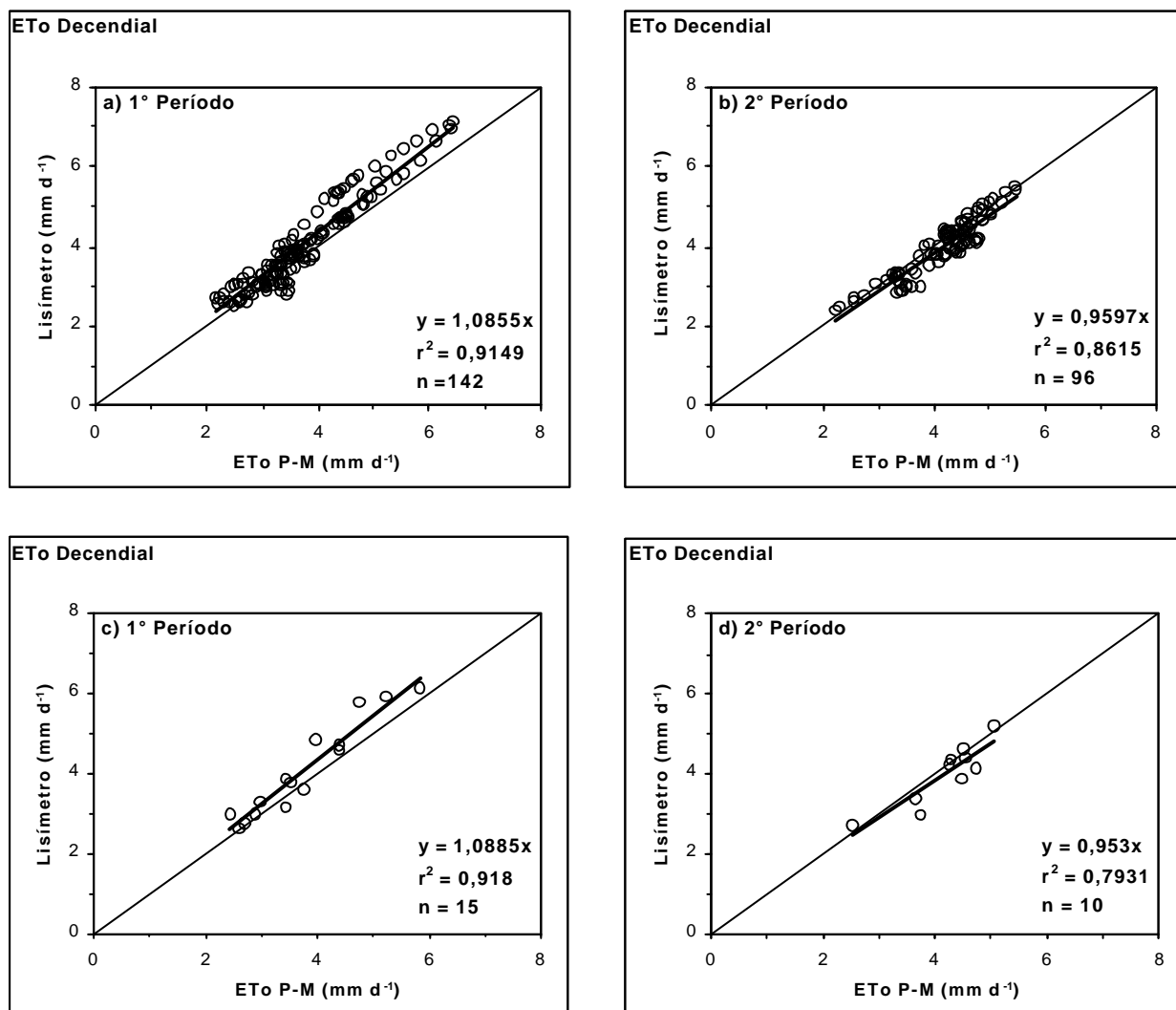


Figura 3. Relação entre a ETo medida (Lisímetro) e a estimada (P-M), na escala decencial, utilizando passo 1 (a e b) e passo 10 (c e d), para dois períodos de 1996 (1°. período.– janeiro a junho; 2°. período– agosto a novembro), em Piracicaba, SP.

Utilizando-se as estimativas de R_n obtiveram-se estimativas de ET_o tanto na escala mensal como decenal. Em função dos resultados relatados nas Tabelas 1 e 2 optou-se por avaliar apenas as estimativas com a média móvel de passo 1 nas duas escalas de tempo. Em geral, os resultados indicam que as estimativas de ET_o com R_n estimado, quando comparadas àquelas com R_n medidos apresentaram pequena melhoria no primeiro período (Figura 4a e 4c), com pequena piora no segundo período (Figura 4b e 4d). Esta é uma indicação de que o método de P-M (ALLEN, 1998) pode ser usado também em época com falta de medidas de R_n .

Os resultados aqui apresentados e discutidos mostraram ajustes bem melhores que aqueles relatados por PERES et al. (1995), tanto na escala mensal como decenal, e que foram obtidas com lisímetro de drenagem que não permite a obtenção de valores diários de ET_o , sendo bem menos sensíveis que o lisímetro de pesagem aqui utilizado.

Conclusões

As relações estatísticas resultantes não diferiram daquelas relatadas por ALLEN et al. (1989), sendo possível concluir-se que:

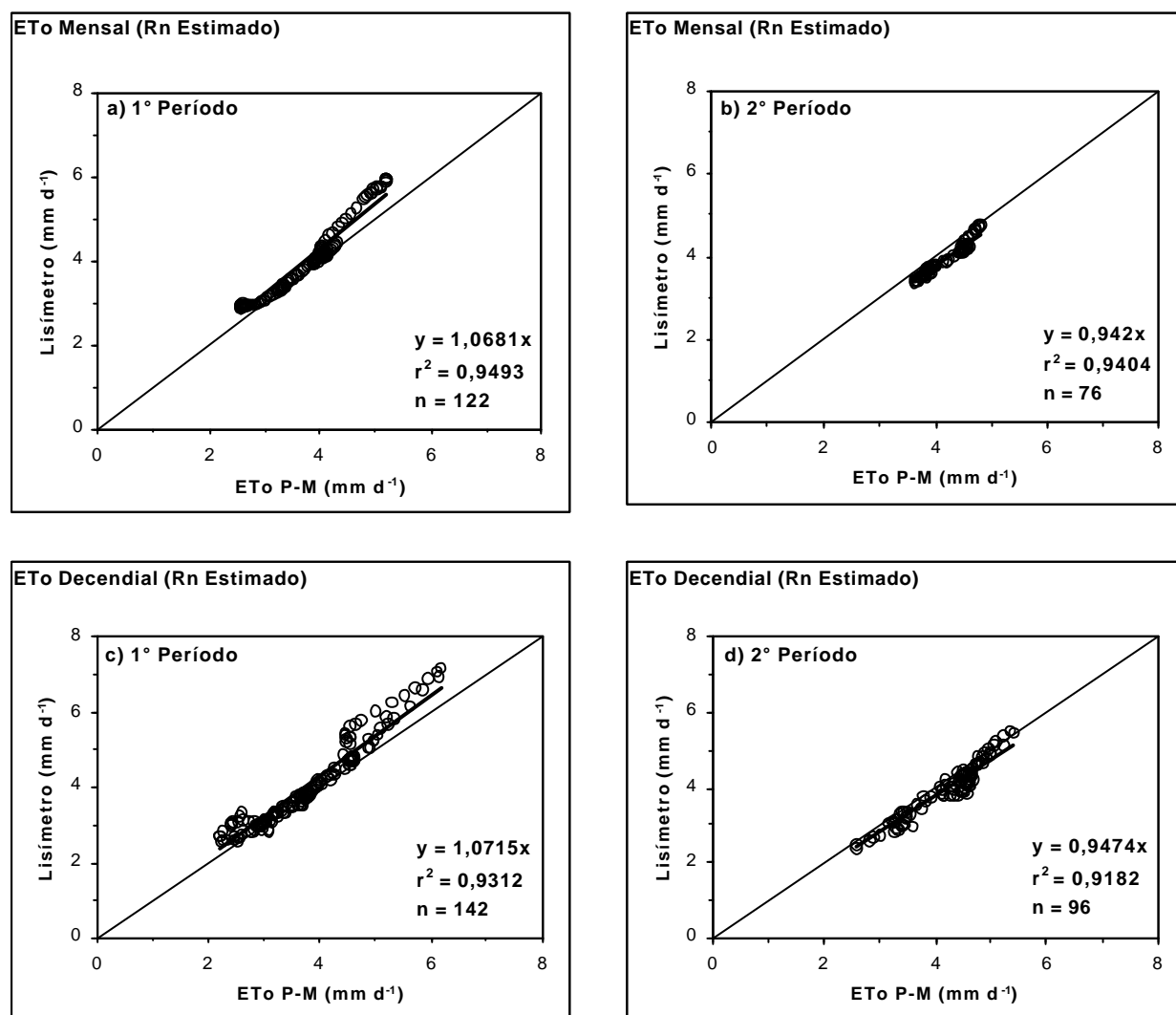


Figura 4. Relação entre a ET_o medida (lisímetro) e a estimada (P-M) com R_n estimado, nas escalas mensal (a e b) e decenal (c e d), referente a dois períodos de 1996 (1.º período– janeiro a junho; 2.º período– agosto a novembro), em Piracicaba, SP.

- Face às dificuldades de mensuração lisimétrica de ETo a performance da parametrização proposta pela FAO para a equação de Penman-Monteith pode ser considerada como adequada tanto para estimativas mensais como decendiais;
- Na ausência de medidas diretas de saldo de radiação, as estimativas de ETo foram semelhantes àquelas obtidas considerando-se os valores medidos de Rn;
- O uso do recurso da média móvel para se aumentar o número de pontos para comparações não alterou significativamente os resultados estatísticos.

Referências bibliográficas

- ALLEN, R.G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.
- ALLEN, R.G. **Crop Evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56)
- BERGAMASCHI, H. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., Piracicaba, 1997. **Anais**. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 222-224.
- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Estudos FAO – Irrigação e Drenagem, 33, traduzido por Gheyi, H.R. et al.).
- FRÈRE, M.; POPOV, G.F. **Prognóstico de cosechas baseado em dados agrometeorológicos.**, Roma: FAO, 1980. 66 p. (Estudio FAO – Produccion y Protection Vegetal, 17).
- LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da irrigação no Brasil. In: Estado das Águas no Brasil, Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos** CD-ROM ANEEL – WMO, Brasília, 1999.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440 p.
- OMETTO, J.C. **Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP**. FEALQ: Piracicaba, 1991. 76 p.
- PEREIRA, F.A.C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) em relação a um lisímetro de pesagem**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1998. 52 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 6, n. 1, p. 65-75, 1995.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) por Penman-Monteith utilizando diferentes tipos de estação meteorológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., Brasília, 1998. CD-ROM.
- 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. 53-58, 1999.
- SOUZA, J.L.; CALHEIROS, C.B.M.; SANTOS, E.A. Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith representativa da região do tabuleiro costeiro de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., Brasília, 1998. CD-ROM.

