

ESTIMADOS POR DIFERENTES MÉTODOS**Hermes Alves de Almeida***Pesquisador, CEPLAC- Centro de Pesquisas do Cacau, Caixa Postal 07, 45.600-000, Itabuna, Bahia***Antonio Evaldo Klar***Professor Titular, Departamento de Engenharia Rural, FCA, UNESP, 18603-970, Botucatu, SP***Nilson Augusto Villa Nova***Professor Associado, Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ, 13418-900, Piracicaba, SP***1 RESUMO**

O presente trabalho compara os dados de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados por diferentes métodos. O experimento foi realizado no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), Ilhéus, Bahia, latitude 14° 45'S, longitude 39° 16'W e altitude de 41 m. Os dados meteorológicos foram coletados dentro da área experimental e na estação agrometeorológica do CEPEC, durante o período de 01.01.1988 a 31.12.1994. O método de Penman-Monteith (P-M) foi eleito o padrão, sendo os valores de ET_o comparados com os obtidos pelos métodos de Penman-FAO (P-F) e Tanque Classe A (TCA). Os resultados mostraram que os totais semanais de ET_o maiores do que 14 mm ocorreram, com maior frequência, independentemente do método utilizado. O elevado nível de significância estatística encontrada no método de Penman-Monteith, utilizando-se dados coletados no interior de uma plantação de cacau, por exemplo, possibilita maior expansão de uso da referida equação para locais específicos, a partir de dados coletados fora da área experimental (estação agrometeorológica padrão). Por outro lado, a baixa precisão encontrada nos totais de ET_o, determinados utilizando-se o método do TCA, quando correlacionados com os obtidos pelas equações de P-M ou de P-F, não permite recomendar a sua utilização como equação de estimativa diária de ET_o.

UNITERMOS: Evapotranspiração de referência, Penman-Monteith, Penman-FAO, Tanque Classe A, Irrigação

ALMEIDA, H.A., KLAR, A.E., VILLA NOVA, N.A. COMPARISON OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION DATA ESTIMATED BY DIFFERENT METHODS**2 ABSTRACT**

The aim of this study was to compare the reference evapotranspiration data estimated by different methods. The work was carried out at "Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC)", in Ilhéus, State of Bahia, Brazil, latitude 14° 45'S, longitude 39° 16'W and altitude of 41 m. The meteorological data used in this estimation were collected at CEPEC experimental plot and standard Agrometeorological Station. The standard method was that of Penman-Monteith and the values of ET_o compared with those obtained by Penman-FAO and Class A pan methods. The results showed that the totals of the ET_o higher than 14 mm.week⁻¹ occurred more frequently independent of the method used. The high level of statistical significance presented by Penman-Monteith allows the use P-M equation for specific locations such as in a cocoa farm, for instance, from collected data outside of experimental plot (standard Agrometeorological Station). On the other hand, the low accuracy found in the estimated ET_o totals using Class A pan methods, when correlated with those obtained by Penman-Monteith or Penman-FAO method, does not allow to recommend its use as equation of daily estimation ET_o.

KEYWORDS: Reference evapotranspiration, Penman-Monteith, Penman-FAO, Tanque Classe A, irrigation

3 INTRODUÇÃO

A transferência de água, no estado de vapor, para a atmosfera quer pela evaporação de superfícies líquidas ou pela transpiração vegetal, constitui um importante elo do ciclo hidrológico da natureza. Como o vapor transportado na atmosfera, pode condensar-se e precipitar-se a grande distância de sua origem, a mudança de fase de líquido ↔ vapor representa o maior mecanismo para redistribuição da energia em todo o globo (Berlato & Molion, 1981).

A evaporação da água de uma superfície úmida mais a transpiração vegetal é denominada de evapotranspiração. O primeiro relato sobre o termo evapotranspiração potencial (ETP) foi feito por Thornthwaite (1948), que o definiu como a perda de água de uma extensa superfície vegetada, de porte rasteiro, em fase de desenvolvimento ativo e sem limitações hídrica.

Doorenbos & Pruitt (1977) introduziram o termo evapotranspiração de referência (ET_o), em substituição à ETP, definindo-o como a perda de água de uma extensa superfície coberta com grama, com porte de 8 a 15 cm, em crescimento ativo e sem restrição hídrica.

A ET_o enunciada por estes autores representa uma extensão da definição original de Penman (1948); Penman (1956) para ETP, que pode ser definida como: a quantidade de água evapotranspirada, na unidade de tempo, por uma vegetação rasteira, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo completamente o solo e sem limitação de água.

O método de estimativa da evapotranspiração de referência de Penman (1948) foi o marco inicial no estudo de evapotranspiração neste século. É enquadrado na categoria de métodos combinados porque associa o saldo de energia radiante à superfície aos processos de transferência dos componentes aerodinâmicos. Os outros métodos desse grupo são aproximações e/ou extensão deste. Assim sendo, várias fórmulas tem sido testadas e avaliadas, em todo o mundo, visando a sua modificação e/ou simplificação do referido método no sentido de ampliar a sua utilização.

De acordo com Monteith (1965), o método original de Penman poderia também descrever a evapotranspiração de um estrato vegetal, considerando-se a resistência que a planta oferece ao processo de transpiração através dos (estômatos) ou seja a resistência estomática (r_s). Fazendo-se uma analogia com a Lei de Ohm, para circuitos elétricos, Monteith (1965) introduziu, no termo aerodinâmico, duas resistências à transferência de vapor d'água: a resistência do dossel (r_c) e a resistência aerodinâmica (r_a).

A inclusão destas resistências na equação original de Penman passou a ser mundialmente conhecido como o método de Penman-Monteith (1965). Este método pode ser considerado o mais completo para explicar a partição de energia, em termos de calor sensível e latente (Bruin & Holtslag, 1982).

Várias outras modificações foram adotadas no método original de Penman, especialmente, as introduzidas e recomendadas no Boletim FAO-24 que envolvem: a) a função do vento; b) um fator de ajustamento (C) que é função das condições locais de clima (umidade relativa máxima, razão entre a velocidade do vento diurna e noturna e radiação solar global à superfície) e c) a hipótese de que o fluxo de calor no solo (G) ser igual a zero, para períodos superiores a 24h. O método original de Penman após a implementação destas modificações passou a ser denominado de Penman-FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977)

A maioria dos trabalhos científicos sobre evapotranspiração de referência tem sempre no seu contexto uma análise comparativa entre os valores de ET_o medido em lisímetros e os estimados por diferentes métodos ou mesmo, elegendo-se um método padrão que é comparado com os demais. Para Allen (1989) existe uma relação entre a ET_o medida em lisímetro e as estimadas pelas diferentes equações existente, especialmente, àquelas provenientes dos métodos combinados, Penman por exemplo, e do Tanque Classe A.

Comparando-se dados de ET_o medidos em lisímetros de precisão, instalados em onze diferentes locais, com os dados determinados utilizando-se vinte métodos de estimativa, Jensen et al. (1990) concluíram que o método de Penman-Monteith é o melhor e o Penman FAO o pior, devido superestimativa da ET_o, na faixa de 15 a 20%, para qualquer local.

Katul et al. (1992) compararam a ET_o medida em lisímetros com a estimada pelos métodos de Penman original, Tanque Classe A e Penman-Monteith, para períodos de 1 a 30 dias, numa série de dezanove anos. Os resultados indicaram uma excelente correlação com o método de Penman-Monteith, com r^2 de 0,87 e 0,98 para valores diários e mensais, respectivamente. Embora o método de Penman disponha de um excelente embasamento físico, o de Penman-Monteith FAO foi considerado o mais preciso, sendo, portanto, recomendado como método padrão (Luchiari Jr. & Riha, 1991; Smith, 1991; Decker, 1994).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), localizado no km 22 da rodovia Ilhéus-Itabuna, no município de Ilhéus, Bahia, latitude 14° 45'S, longitude 39° 16'W e altitude de 41 m.

Os dados meteorológicos foram coletados no interior de uma plantação de cacau e na Estação Agrometeorológica do CEPEC, acerca de 500 m do local do experimento. Na área experimental, foram instalados em abrigos meteorológicos padronizados e sob as copas dos cacaueiros, um registrador de temperatura do ar e umidade relativa (termohigrógrafo). Os dados de radiação solar global, número de horas de sol (insolação), velocidade do vento, evaporação do Tanque Classe A e pressão atmosférica, além dos relacionados acima, foram coletados na Estação Agrometeorológica.

Dos registros contínuos de temperatura e umidade relativa do ar, foram computados os valores pontuais, a cada hora, ao invés da média horária. A média diária desses elementos foi determinada pela média aritmética dos seus valores horários. O mesmo critério foi utilizado no cálculo da pressão parcial de saturação de vapor (e_s) e no déficit de pressão de saturação de vapor (DPV).

4.1 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

Para estimar a evapotranspiração de referência diária (ET_o), utilizaram-se os métodos de Penman-Monteith (Smith, 1991), Penman-FAO e Tanque Classe A (Doorenbos & Pruitt, 1977) conforme as equações descritas a seguir.

4.1.1 Método de Penman-Monteith (ET_oPM)

$$ET_{oPM} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_a - e_d) \quad (1)$$

sendo:

ET_oPM = evapotranspiração de referência (mm.d⁻¹);

Δ = tangente a curva da tensão de vapor de saturação (kPa.°C⁻¹)

$$\Delta = \frac{4098 \times e_a}{(t_{med} + 237,3)^2} \quad (2)$$

e_a = tensão de saturação de vapor diária (kPa)

t_{med} = temperatura média do ar diária (°C).

$$e_a = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \times t_{med}}{t_{med} + 237,3}\right) \quad (3)$$

γ^* = coeficiente psicrométrico modificado (kPa.°C⁻¹)

$\gamma^* = \gamma (1 + r_c / r_a)$

Conforme estabelecido por Allen et al. (1989), as resistências do dossel do cultivo (r_c) e aerodinâmica (r_a) foram utilizadas como sendo, respectivamente, de 69 sm⁻¹ e de 208/U₂ sm⁻¹.

R_n = saldo de radiação na superfície da cultura (MJ.m⁻².d⁻¹) estimado por:

$$R_n = Q_g(1-r) - \sigma \frac{(T_{max}^4 + T_{min}^4)}{2} \times (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \times \left(0,1 + 0,9 \times \frac{n}{N}\right) \quad (4)$$

sendo:

Q_g = radiação solar global (MJ.m⁻².d⁻¹);

r = albedo da superfície (= 0,23);

σ = Constante de Stefan-Boltzman ($0,49 \times 10^{-7}$ MJ.m⁻².d⁻¹.K⁻⁴);

T_{max} = temperatura máxima do ar (K);

T_{min} = temperatura mínima do ar (K);

n = número de horas e décimos de brilho solar (insolação);

N = comprimento máximo do dia (fotoperíodo).

G = fluxo de calor no solo diário (MJ.m⁻².d⁻¹) determinado pela fórmula proposta por Wright & Jensen (1972), ou seja:

$$G = 0,38 (t_{med\ i} - t_{med\ i-3}) \quad (5)$$

t_{med} = temperatura média do ar do dia i e de três dias antes $i-3$.

λ = fluxo de calor latente de vaporização (MJ.kg⁻¹)

$$\lambda = 2,501 - (0,002361) \times t_{med} (\text{°C}) \quad (6)$$

U_2 = velocidade do vento à 2 m altura (m.s⁻¹)
 $ea-ed$ = déficit de pressão de saturação (kPa)

$$ed = (ea \times UR) \times 0,01 \quad (7)$$

900 = fator de correção (kg.K.KJ⁻¹)

4.1.2 Método de Penman-FAO (EToPF)

$$EToPF = c[W \times R_n + (1-W) \times Ea] \quad (8)$$

EToPF = evapotranspiração de referência (mm.d⁻¹);
 c = fator que ajusta a relação entre velocidade do vento diurna e noturna para umidade relativa máxima e radiação solar (mm por dia). Este fator foi determinado pela equação proposta por Frevert et al. (1983):

W = fator relativo ao efeito de temperatura do ar e altitude. Calculado pela equação proposta por Viswanadham et al. (1991):

$$W = 0,483 + 0,01 t_{med} (16 \text{ °C} \leq t_{med} \leq 31 \text{ °C}) \quad (9)$$

R_n = saldo de radiação (mm.d⁻¹) estimado pela expressão:

$$R_n = (R_s \times 0,77) - 1,98 \times 10^{-9} \times T_{med}^4 \times (0,34 - 0,044 \sqrt{ea}) \times (0,1 + 0,9 \times \frac{n}{N}) \quad (10)$$

sendo: R_s = radiação solar global (cal.cm⁻².d⁻¹);

T_{med} = temperatura média do ar diária (K);

ea = pressão parcial de vapor (mb)

Ea = poder evaporante do ar (mm.d⁻¹) obtido pela Equação (11)

$$Ea = 0,27 \times (1 + 0,01 V_2) \times (es - ea) \quad (11)$$

V₂ = velocidade do vento a 2m de altura do solo, em km.d⁻¹ e

es-ea = déficit de pressão de saturação (mb)

4.1.3 Método do Tanque Classe A (EToCA)

$$EToCA = K_p \times ETCA \quad (12)$$

EToCA = evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

K_p = coeficiente do tanque classe A, sendo utilizado os valores propostos por Doorenbos & Pruitt (1977);

ETCA = evaporação do Tanque Classe A (mm.d⁻¹).

Para efetivação dos cálculos diários e semanais da evapotranspiração de referência, dos os métodos utilizados no presente trabalho, foram elaborados programas específicos utilizando-se a planilha eletrônica Excel.

4.2 Comparação de dados de ETo estimados por diferentes métodos

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e déficit de pressão de saturação, coletados e/ou estimados sob a copa do cacauzeiro (área experimental), foram utilizados nas equações de Penman-Monteith e Penman-FAO, obtendo-se, assim, uma nova série de dados de ETo denominados, neste trabalho, como de EToPMsb e EToPFsb.

Escolheu-se o método de Penman-Monteith como o padrão. Comparou-se os totais diários e semanalmente de ETo estimados por este método, para as duas condições (EToPM e EToPMsb), e os obtidos pelos métodos de Penman-FAO (EToPF e EToPFsb) e Tanque Classe A.

Para estabelecer a equação de regressão linear, considerou-se os valores de ETo, obtidos pelo método de Penman-Monteith, como variável dependente e os estimados pelos outros métodos como independente, cujo modelo estatístico pode ser escrito como:

$$EToPM = a + b \times ETo + \text{erro} \quad (13)$$

ETo = evapotranspiração estimada pelos métodos de Penman-FAO e Tanque Classe A em milímetros e

a e b = coeficientes angular e linear da reta, respectivamente.

Para comparar os totais de ETo estimados pelos diferentes métodos, utilizou-se a metodologia preconizada por Katul et al. (1992) que fundamenta-se no erro padrão da estimativa (s-mm), sendo calculado pela Equação (14):

$$s = \sqrt{\frac{\sum (EToPMsb - ETo)^2}{n - 2}} \quad (14)$$

sendo:

EToPMsb = evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (na área experimental);

ETo = evapotranspiração de referência estimadas pelos outros métodos e/ou outras condições e

n= número de observações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados médios diário e semanais de evapotranspiração de referência, estimados pelos métodos de Penman-Monteith (EToPM e EToPMsb), Penman-FAO (EToPF e EToPFsb) e Tanque Classe A (EToCA), são apresentados no Quadro 1. As letras (sb) agregadas as siglas indicam que para estimar a ETo foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de saturação coletados no interior da área experimental. As siglas sem essas letras referem-se a estimativas com dados observados no posto (estação) agrometeorológico. Observa-se uma certa variabilidade entre os valores de ETo que pode ser justificada pelos fundamentos físicos inerentes a cada método de estimativa. Mesmo assim, verificam-se tendências similares nas oscilações entre os totais de evapotranspiração obtidos pelas equações de Penman-FAO (P-F) e Tanque Classe A (TCA) e àqueles obtidos pelo método de Penman-Monteith (P-M), em ambas as condições (área experimental e posto). Os valores de ETo determinados pelas equações de P-F e TCA foram, respectivamente, menores e maiores que os encontrados pelo método de P-M.

A distribuição de frequência relativa (%) dos totais semanais de ETo determinados pelos diferentes métodos (Quadro 2), mostra que evapotranspiração acumulada inferior a 7 mm não foi constatada em nenhuma das 364 semanas estudadas.

Como pode ser observado no referido Quadro, valores semanais de ETo superior a 14 mm ocorreram com maior frequência, independentemente do método utilizado. Houve maior predominância de totais inferiores a 14mm (42,7% das semanas) e superiores a 21mm (46,8%), quando se utilizaram os métodos de P-F (EToPFsb ou EToPF) e TCA, respectivamente.

Os dados de frequência relativa apresentados no Quadro 2 indicam a probabilidade empírica (%) de ocorrência de ETo, nos três intervalos de classe, em relação ao número total de semanas (=364) dos anos estudados, ou seja, o valor mais provável de ocorrência em termos médios.

O Quadro 3 mostra as frequências de ocorrências de semanas com totais de EToPM e EToPMsb, nos mesmos intervalos, anualmente. Os menores percentuais de ETo, em cada classe, indicam que a maioria de semanas provieram dos meses mais frios do ano na Bahia (maio a agosto-setembro) e os maiores dos mais quentes (outubro a março-abril).

Quadro 1 - Totais diários e semanais de evapotranspiração de referência estimados pelos de Penman-Monteith (EToP-M), Penman-FAO (EToP-F) e Tanque Classe A (EToCA)

Métodos	Diário			Semanal		
	máximo	mínimo	mediana	máximo	mínimo	mediana
EToP-M ⁽¹⁾	4,9	0,4	2,6	33,3	9,6	18,0
EToP-Msb ⁽²⁾	4,9	0,4	2,5	34,0	9,3	18,0
EToP-F ⁽¹⁾	4,2	0,2	2,2	30,0	7,3	15,3
EToP-Fsb ⁽²⁾	4,6	0,3	2,1	30,1	7,3	14,9
EToCA ⁽¹⁾	6,0	0,3	2,9	44,3	8,9	20,0

⁽¹⁾utilizando-se dados coletados no posto agrometeorológico e ⁽²⁾ no interior da área experimental.

Quadro 2 - Frequência relativa (%) de ocorrência de semanas com totais de ETo estimados pelos métodos de P-M (EToPM e EToPMsb), P-F (EToPF e EToPFsb) e Tanque Classe A (EToCA).

Método e condição	percentuais de semanas com ETo nos respectivos intervalos		
	7<ETo ≤ 14	14<ETo ≤ 21	ETo >21 mm
EToPM	24,4	41,4	34,2
EToPMsb	22,7	41,9	35,3
EToPF	42,7	45,8	11,5
EToPFsb	42,7	48,8	8,5
EToCA	13,7	39,5	46,8

Quadro 3 - Frequência relativa (%) de ocorrência do número de semanas com totais de ETo estimados pelo método de Penman Monteith para as duas condições estudadas (EToPM e EToPMsb)

Ano	EtoPM	Ano	EtoPMsb
-----	-------	-----	---------

	1	2	3		1	2	3
1988	48,1	46,2	5,8	1988	30,8	42,3	26,9
1989	51,9	42,3	5,8	1989	40,4	34,6	25,0
1990	0	51,9	48,1	1990	28,8	42,3	28,8
1991	41,5	52,8	5,7	1991	17,0	47,2	35,8
1992	48,1	50,0	1,9	1992	23,1	53,8	23,1
1993	32,7	50,0	17,3	1993	13,5	34,6	51,9
1994	25,0	51,9	23,1	1994	5,8	38,5	55,8

7 mm < ETo ≤ 14 mm; (2) 14 mm < ETo ≤ 21mm e (3) ETo > 21 mm

Fazendo-se uma análise comparativa, verifica-se que a frequência de ocorrência da lâmina de EToPM maior do que 21 mm, por exemplo, oscilou de 1,9 a 48,1% das semanas e a EToPMSb de 23,1 a 55,8% (Quadro 3) enquanto que, a oscilação média esperada foi de 34,2 e 35,3% , respectivamente (Quadro 2).

5.1 Comparação de dados de ETo calculados por diferentes métodos

As diferenças existentes entre os valores de ETo determinados pelo método de Penman-Monteith (nas duas condições - posto e área experimental) foram pequenas: média semanal de 18,3 mm na primeira situação (EToPM) e de 18,2 mm na segunda (EToPMSb). Os totais máximo e mínimo observados foram, respectivamente, de 34,0 e 9,6 mm e 33,3 e 9,3 mm. Tendência similar foi verificada com a equação de Penman-FAO com médias de 15,5 mm para a (EToPF) e 15,3 mm para a (EToPFsb). Essa diferença irrelevante, já era esperada uma vez que não houve modificações ou até mesmo simplificações nos métodos de P-M e P-F e sim, substituições de dados de temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de saturação, medidos no interior de uma plantação de cacau, nas suas respectivas equações. Ressalta-se, que esses elementos meteorológicos são utilizados nos cálculos da constante psicrométrica (γ) e na tangente à curva de tensão de vapor saturação (Δ) e, por isso, podem ser considerados fatores de ponderação que determinam a divisão da energia incidente entre os processos de evaporação e convecção (Monteith, 1965).

Os totais diário e/ou semanal de ETo calculados pela equação de Penman-FAO, para ambas as condições (área experimental e posto agrometeorológico) foram, em média, cerca de 15% menores do que os obtidos pelo método de Penman-Monteith. Esses resultados diferem dos encontrados por vários autores (Weiss, 1982; Batchelor, 1984; Allen, 1986; Jensen et al., 1990; Hargreaves, 1994) que encontraram maiores valores de ETo estimados pelo método de P-F quando comparados com os obtidos pela equação de P-M e/ou com dados medidos em lisímetros.

Acredita-se que a tendência de superestimativa da ETo, não confirmada neste trabalho, esteja relacionada com às condições meteorológicas do local, caracterizadas pelo teor elevado de umidade relativa do ar (maior do que 85% a partir das 19:00 h em qualquer dia do ano) e baixa velocidade do vento, especificamente, no período noturno. Essas características resultaram num fator de ajustamento, proposto por Frevert et al. (1983), relativamente pequeno ($c=0,728$). Uma vez que esse fator é multiplicativo nos dois termos da equação de Penman-FAO (diabático e adiabático) é possível que essa seja a principal causa da subestimativa da ETo.

Ressalta-se, ainda, que a determinação mais precisa do déficit de pressão de saturação de vapor d'água diário (DPV), utilizando-se a média dos valores horários de temperatura (na estimativa da tensão de saturação -es), em vez da média diária a partir de leituras feitas em três horários padronizados, como preconiza as normas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), tenha resultado num menor DPV. Como afirma Sedyama (1996), a depender do método utilizado no cálculo do DPV diário, a magnitude do termo aerodinâmico pode ser afetada.

O termo aerodinâmico da equação de Penman incorpora uma função empírica da velocidade do vento e do déficit de pressão de saturação. Assim, a baixa velocidade do vento pode ter sido outro fator a contribuir na subestimativa da ETo. O grande número de fórmulas existentes na literatura para descrever esse termo: oito equações para a função vento e quinze para o déficit de pressão de saturação podem ocasionar resultados diferenciados de ETo. A depender do método utilizado na estimativa do DPV diário, a função do vento pode ser linear ou curvilínea (Doorenbos & Pruitt, 1977) e os erros relativos na ETo podem até ser do maiores que 100%, em alguns casos, independente do método usado (Pereira et al., 1996).

Observou-se, neste trabalho, que o método do Tanque Classe A superestimou os valores de ETo em relação ao de Penman-Monteith (Quadro 1). Esses resultados confirmam os encontrados por Katul et al. (1982); Bastos (1994); Pereira et al. (1995) bem como a hipótese de Ometto (1981) na qual é proposta que devido a geometria, constituição metálica, disposição sobre o solo e massa de água relativamente pequena do Tanque, a evaporação é superestimada.

A principal causa da superestimativa na estimativa da ETo, utilizando-se o método do Tanque Classe A, pode estar relacionada, também, com o valor do coeficiente k_p (Chiew & McMahon, 1992). Esse fator de correção varia em função do tamanho da área tampão (fetch), da cobertura do solo, umidade relativa e velocidade do vento. Na prática, utiliza-se, geralmente, os valores Quadrosos de k_p , variando de 0,35 a 0,85, que foram estabelecidos por Doorenbos & Kassam (1979).

A Figura 1 mostra as retas de regressão com os respectivos coeficientes de determinação ajustado (r^2) entre os valores semanais de evapotranspiração determinados pelo método de P-M versus os de P-F e Tanque Classe A. Os elevados r^2 ($> 0,97$) e a baixa dispersão dos valores de ETo na reta de regressão (1:1) para os métodos: a) P-M (EToPMsb x EToPM) e b) P-M versus P-F (EToPMsb x EToPF) mostraram-se altamente correlacionados entre si. O excelente ajuste pode ser justificado em função dos dois métodos utilizarem a mesma base física, combinando o termo energético e aerodinâmico. Já a dispersão dos valores de ETo nas retas do método P-M com o TCA não se mostrou tão uniforme quanto as duas anteriores. Essas dispersões dos dados nas retas podem ser explicadas pelo próprio valor do coeficiente de determinação ajustados ($r^2 \cong 0,75$), indicando, portanto, que cerca de 25% dos pontos distribuídos em volta das retas não foram explicados pela regressão.

As análises estatísticas dos modelos mais representativos de evapotranspiração de referência são mostradas nas Quadros 4 a 8. Pelos indicadores estatísticos, verificam-se que as equações foram bem ajustadas, especialmente, aquelas que envolvem os métodos de P-M e P-F. Em termos médio e na escala semanal, os coeficientes de determinação ajustados (r^2) e de variação (C.V.) foram, respectivamente, de: 0,996 e 1,67% (EToPMsb x EToPM); 0,973 e 4,25% (EToPMsb x EToPF); 0,752 e 12,90 (EToPMsb x EToCA); 0,971 e 4,40 (EToPMsb x EToPFsb) e de 0,752 e 12,62 (EToPM x EToCA). Aliados a esses parâmetros estatísticos, todos os modelos testados foram altamente significativos a 0,01% de probabilidade pelos testes F e T, o que explica em parte a variação dos dados.

É importante destacar que os indicadores da qualidade do ajustamento (coeficientes de determinação e variação) dos modelos de Penman-Monteith e/ou P-M versus P-F, mostraram altos valores de r^2 , baixos de C.V., altamente significativos através dos testes F e t e outros parâmetros estatísticos (Quadros 4, 5 e 7). Essa significância estatística garante menor dispersão dos dados estimados e, conseqüentemente, melhor precisão na estimativa da variável dependente (EToPMsb).

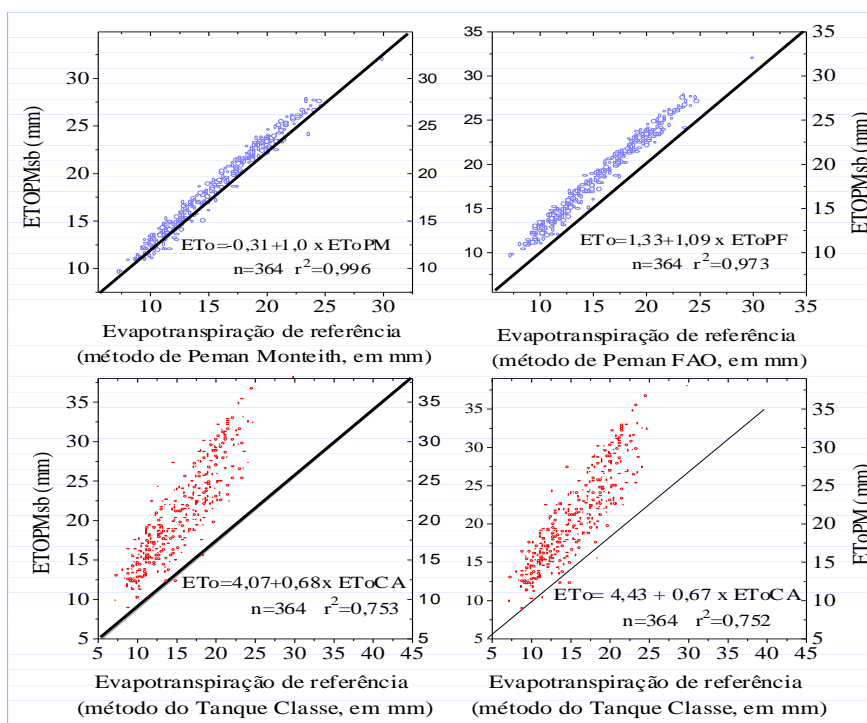


Figura 1 - Relação entre os valores semanais de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith, para as duas condições (EToPMsb e EToPM), e os obtidos pelos métodos de Penman-FAO (EToPF) e Tanque Classe A (EToCA).

Quadro 4 - Análise estatística do modelo semanal mais representativo entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, na área experimental (EToPMsb) e no posto agrometeorológico (EToPM).

Parâmetros da regressão				
Variável	parâmetro estimado	Erro padrão	teste T	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	-0,31	0,065	-6,005**	-0,18 a -0,43
EToPM	1,01	0,003	295,942**	1,00 a 1,01

**altamente significativo a 0,01% de probabilidade

Equação:

$$\text{EToPMsb}(\text{mm por semana}) = -0,31 + 1,01 \times \text{EToPM}(\text{mm por semana}); \bar{r}^2=0,996 \text{ e C.V} = 1,67$$

Quadro 5 - Análise estatística do modelo semanal mais representativo entre a ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith, na área experimental (EToPMsb), e Penman-FAO (EToPF).

Parâmetros da regressão				
Variável	parâmetro estimado	Erro padrão	teste T	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	1,33	0,152	8,709**	1,03 a 1,63
EToPF	1,09	0,009	114,486**	1,07 a 1,10

** altamente significativo a 0,01% de probabilidade

Equação:

$$\text{EToPMsb}(\text{mm por semana}) = 1,33 + 1,09 \times \text{EToPF}(\text{mm por semana}); \bar{r}^2=0,973 \text{ e C.V} =4,25$$

Quadro 6 - Análise estatística do modelo semanal mais representativo entre a ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith, na área experimental (EToPMsb), e Tanque Classe A (EToCA).

Parâmetros da regressão				
Variável	parâmetro estimado	Erro padrão	teste T	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	4,07	0,442	9,201**	3,21 a 4,94
EToCA	0,68	0,020	33,287**	0,64 a 0,72

** altamente significativo a 0,01% de probabilidade

Equação:

$$\text{EToPMsb}(\text{mm por semana}) = 4,07 + 0,68 \times \text{EtoCA}(\text{mm por semana}); \bar{r}^2=0,752 \text{ e C.V} =12,9$$

Quadro 7 - Análise estatística do modelo semanal mais representativo entre a ETo estimada pelos métodos de P-M (EToPMsb) e P-F (EToPFsb), ambos na área experimental.

Parâmetros da regressão				
Variável	parâmetro estimado	Erro padrão	teste T	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	1,80	0,154	11,702**	1,50 a 2,11
EToPFsb	1,07	0,009	110,633**	1,05 a 1,09

** altamente significativo a 0,01% de probabilidade

Equação:

$$\text{EToPMsb}(\text{mm por semana}) = 1,80 + 1,07 \times \text{EToPFsb}(\text{mm por semana}); \bar{r}^2=0,971 \text{ e C.V} =4,40$$

Quadro 8 - Análise estatística do modelo semanal mais representativo entre a ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith (EToPM) e Tanque Classe A (EToCA).

Parâmetros da regressão				
Variável	parâmetro estimado	Erro padrão	teste T	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	4,43	0,435	10,171**	3,58 a 5,28
EToCA	0,67	0,020	33,216**	0,63 a 0,71

** altamente significativo a 0,01% de probabilidade

Equação:

$$\text{EToPM}(\text{mm por semana}) = 4,43 + 0,67 \times \text{EToCA}(\text{mm por semana}); \bar{r}^2=0,752 \text{ e C.V} =12,62$$

Os erros padrões da estimativa da evapotranspiração (s), diária e semanal são mostrados no Quadro 9. O erro padrão é uma medida da dispersão dos dados de ETo calculados por qualquer uma das equações de estimativa em relação aos obtidos pelo método padrão na condição experimental (EToPMsb). Esse desvio mostrou variações diárias na ETo de 0,07 a 0,98 mm e

semanais de 0,37 a 3,71 mm. Como já era esperado, os menores erros padrões foram encontrados ao comparar os valores de ETo obtidos pelo método de Penman-Monteith e os maiores, com os determinados pela equação do Tanque Classe A.

Quadro 9 - Erro padrão da estimativa da evapotranspiração de referência (s), calculado tomando-se com referência os valores de ETo obtidos pelo método de Penman-Monteith na condição da área experimental (ETOPMsb).

Métodos	n ⁽¹⁾	s (mm.dia ⁻¹)	n ⁽¹⁾	s (mm.semana-1)
Penman-Monteith	2554	0,07	364	0,37
Penman-FAO	2554	0,43	364	2,77
Penman-FAO sombra	2554	0,44	364	2,91
Tanque Classe A	2554	0,98	364	3,71

⁽¹⁾ número de observação

O Quadro 10 mostra um sumário das análises estatísticas dos modelos de ETo diário e semanal. Observa-se no referido Quadro que os coeficientes de determinação variaram, diariamente, de 0,34 a 0,88 e os erros padrões da estimativa do modelo (SEE) de 0,004 a 0,011 mm. Para os modelos semanais as variações foram de 0,75 a 0,99 para os coeficientes de determinação e de 0,003 a 0,020 mm para os erros padrões. O pior modelo de estimativa da evapotranspiração foi encontrado com o método do Tanque Classe A, traduzido pelos menores r^2 e maiores SEE.

Os modelos que envolvem as combinações com os métodos de Penman resultaram nos melhores ajustamentos, que podem ser aferidos pela significância estatística de seus parâmetros nas análises de variância (r^2 e C.V.) e de regressão (SEE) como também, pelos baixos valores dos erros padrão da estimativa (s) dos dados de ETo. A boa correlação obtida com os referidos métodos confirma os resultados encontrados por Doorenbos & Pruitt (1977); Allen et al.(1989); Allen & Pruitt (1991) e Decker (1994). Por outro lado, o ajuste encontrado nos modelos P-M e/ou P-F versus Tanque Classe A, mostrou maiores r^2 e menores C.V. do que os obtidos por Chiew & McMahon (1992); Mohan (1991).

Quadro 10 - Sumário das análises estatísticas comparativas das equações para estimativas da evapotranspiração de referência

Métodos	diária (mm)				semanal (mm)			
	a	b	SEE ⁽⁴⁾	r^2	a	b	SEE ⁽⁴⁾	r^2
Penman-Monteith ⁽¹⁾	0,09	0,95	0,004	0,95	-0,31	0,92	0,003	0,99
Penman-FAO ⁽¹⁾	0,44	0,97	0,008	0,84	1,33	1,09	0,008	0,97
Penman-FAO sombra ⁽¹⁾	0,35	1,03	0,008	0,88	1,80	1,07	0,009	0,97
Tanque Classe A ⁽¹⁾	1,35	0,42	0,011	0,34	4,07	0,68	0,020	0,75
Penman-FAO ⁽²⁾	0,36	1,02	0,004	0,86	1,67	1,07	0,008	0,97
Tanque Classe A ⁽²⁾	1,39	0,43	0,011	0,35	4,43	0,67	0,020	0,75
Tanque Classe A ⁽³⁾	1,06	0,40	0,011	0,34	-2,28	0,63	0,017	0,79

⁽¹⁾ comparado com o método de Penman-Monteith na condição da área experimental

⁽²⁾ comparado com o método de Penman-Monteith

⁽³⁾ comparado com o método de Penman-FAO

⁽⁴⁾ erro padrão da estimativa da ETo (mm)

a e b= coeficientes angular e linear da reta de regressão, respectivamente.

A baixa precisão mostrada através do coeficiente de determinação ajustado ($r^2 \leq 0,35$) do método do TCA (Quadro 10), quando correlacionado com o método padrão (P-M) ou mesmo com o de P-F, não permite recomendar a sua utilização como equação de estimativa de ETo diária, pelo menos, nas condições deste trabalho. Mesmo para totais semanais, o uso deste método deve ser restrito a locais desprovidos de informações que não permitam estimar a ETo pela equação de Penman-Monteith.

O elevado nível de significância estatística encontrada no método de Penman-Monteith, para as condições da área experimental, revela maior precisão na estimativa da ETo. Isto possibilita maior expansão de uso para locais específicos, como no interior de uma plantação de cacau, por exemplo, a partir de dados coletados fora da área experimental (estação agrometeorológica padrão) e/ou com dados estimados utilizando-se os métodos de P-F e TCA, desde que devidamente substituídos na equação de regressão para a referida condição (ETOPMsb).

Destaca-se, ainda, que embora o método de P-F tenha apresentado tendência para subestimar os valores de ETo, o modelo ajustado resultou em valores estatisticamente bem correlacionados com os da equação padrão. Assim, a evapotranspiração estimada através do referido método pode ser viabilizada desde que se utilize o modelo de regressão ajustado para o método de Penman-Monteith.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho, pode concluir que:

- a) A evapotranspiração de referência pode ser estimada, diária e semanalmente, pelo método de Penman-Monteith (P-M), para o interior de uma plantação de cacau, utilizando-se dados coletados na estação agrometeorológica padrão;
- b) Os totais diário e/ou semanal de ETo calculados pela equação de Penman-FAO, para ambas as condições (área experimental e posto agrometeorológico) foram, em média, cerca de 15% menores do que os obtidos pelo método de Penman-Monteith;
- c) método do Tanque Classe A superestima os valores de ETo em cerca de 11%; em relação aos obtidos pela equação de Penman-Monteith e não deve ser recomendada para estimativa diária de ETo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.A. Penman for all seasons. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.112, p.348-69, 1986.
- ALLEN, R.G. et al. Operational estimates of reference evaporation. *Agron. J.*, v.81, p.650-62, 1989.
- ALLEN, R.G.A, PRUITT, W.O. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.117, p.758-73, 1991.
- BASTOS, E.A. *Determinação dos coeficientes de cultura da alface (Lactuca sativa L.)* Botucatu, 1994. 101p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- BATCHELOR, C.H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. *Irrig. Sci.*, v.5, p.223-33, 1984.
- BERLATO, M.A., MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. *Bol.Tec.Inst.Pesq. Agron.*, n.7, p.1-95, 1981.
- BRUIN, H.A.R, HOLTSLAG, A.A.M. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime with the Penman-Monteith concept. *J.Appl. Meteorol.Soc.*, v.21, p.1610-21, 1982.
- CHIEW, F.H.S., McMAHON, T.A. An australian comparison of Penman's potential evapotranspiration estimates and classe A evaporation pan data. *Aust. J.Soil Res.*, v.30, p.101-12, 1992.
- DECKER, L.W. Development in agricultural meteorology as a guide to its potential for the twenty-first century. *Agric. For. Meteorol.*, v.69, p.9-25, 1994.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. *FAO Irrig. Drain. Pap.*, n.33, p.1-193, 1979.
- DOORENBOS, J., PRUITT, J.O. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Pap.*, n.24, p.1-179, 1977.
- FREVERT, D.K., HILL, R.W., BRAATEN, C.B. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.109, p.265-71, 1983.
- HARGREAVES, G.H. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.120, p.1132-9, 1994.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. *Evapotranspirations and irrigation water requirements*. New York: ASCE, 1990. p.1-332.
- KATUL, G.C. et al. Analysis of evaporative flux date for various climates. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.118, p.601-19, 1992.
- LUCHIARI Jr, A., RIHA, S.J. Bulk surface resistance and its effect on evaporation rates in irrigated wheat. *Agron.*, v.83, p.885-95, 1991.
- MOHAN, S. Intercomparison of evapotranspiration. *J. Sci. Hydrol.*, v.35, p.447-61, 1991.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment in the state and movement of water living organism. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 1964, San Diego. *Symp. Soc.Exp.Biol.*, v.19, p.205-34, 1965.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo: Agrônômica Ceres, p.1-441, 1981.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond.*, Ser. A, n.193, p.120-45, 1948.
- PENMAN, H, L. Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric.Sci.*, v.4, p9-29, 1956.
- PEREIRA, A.B. et al. Estimativa da evapotranspiração máxima da batata nas condições edafoclimáticas de Botucatu- SP, Brasil. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.3, p.53-8, 1995.
- PEREIRA, A.R. et al. A função do vento de Penman para clima tropical úmido. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.4, p.69-75, 1996.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.4, p.i-xii, 1996.
- SMITH, M.(ed). *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements*. Rome:FAO, 1991. 45p.
- THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, v.38, n.1, p.55-94, 1948.
- VISWANADHAM, Y., SILVA FILHO, V.P., ANDRÉ, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter α for the Amazon forest. *For. Ecol. Manage.*, v.38, p.211-25, 1991.
- WEISS, A. An experimental study of net radiation its components and prediction. *Agron.*, v.74, p.871-74, 1982.
- WRIGHT, J.L., JENSEN, M.E. Peak water requirements of crops in southern Idaho. *J. Irrig.Drain. Div.*, v.109, p.193-201, 1972.