

INFLUÊNCIA DA ACURÁCIA DE INSTRUMENTOS DE MEDIDAS NA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

José Eduardo Pitelli Turco¹; Dilermando Percin²; Dorival Leão Pinto Jr³

¹*Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, jepturco@fcav.unesp.br*

²*Departamento de Ciências Exatas, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP*

³*Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP*

1 RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar quatro métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar), comparando-os com o método de Penman-Monteith, recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) como método padrão para estimativa da ETo, para Jaboticabal, SP. Foram considerados os erros da estimativa da ETo em função da combinação dos erros das variáveis que compõem as equações de estimativa, decorrentes dos instrumentos de medidas utilizados para obtenção dessas variáveis. Para esse fim, foram instalados na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, campus de Jaboticabal, SP, uma estação climatológica automatizada e um tanque Classe A. Por intermédio de um sistema de aquisição de dados, foram obtidas medidas da radiação global, radiação líquida, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento. O resultado da avaliação dos métodos indica um melhor ajuste para estimativa da ETo para o método de Hargreaves. Os métodos de Makkink, Tanque Classe A e Radiação Solar são diferentes do Penman-Monteith, portanto, não podem ser comparados. Para avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração deve-se considerar os erros da estimativa da ETo, evitando possíveis erros de avaliação.

UNITERMOS: Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar.

TURCO, J. E. P.; PERCIN, D.; PINTO JR, D. L. INFLUENCE OF MEASUREMENT INSTRUMENT ACCURACY COMPARED TO REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATING METHODS

2 ABSTRACT

The aim of this investigation was to evaluate four reference methods to estimate evapotranspiration (Makkink, Hargreaves, Class A pan and Radiation), compared to Penman-Monteith method, that is considered standard by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Errors due to variable measurements in the reference evapotranspiration estimate were taken into consideration. The research was developed in an experimental area of the Department of Rural Engineering of the School of Agricultural and Veterinarian Sciences, Campus of Jaboticabal, São Paulo State University.

An automated weather station was used and it was equipped with sensors to measure global and net radiation, temperature, relative humidity, and wind speed. The aftermath showed a better adjustment to Hargreaves. Makkink, Class A pan and Radiation methods are different from Penman-Monteith, therefore, they cannot be compared. To evaluate methods to estimate evapotranspiration and avoid possible evaluation errors, ETo estimate errors must be considered.

KEY WORDS: Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves, Clas A Pan e Solar Radiation.

3 INTRODUÇÃO

A determinação da evapotranspiração é um problema compartilhado por várias ciências que estudam o sistema solo-planta-atmosfera. Devido à necessidade de se conhecer a perda d'água de superfícies vegetadas, vários pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa da evapotranspiração. Uma maneira muito utilizada para obter a evapotranspiração de referência (ETo) em diferentes situações e locais é por meio de métodos de estimativa.

Existem vários métodos para estimativa da ETo, sendo que muitos têm aceitação quase unânime, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados. Nenhum deles, usando dados meteorológicos, é universalmente adequado para todas as condições climáticas, sem um ajuste local ou regional.

Em 1990, os métodos recomendados pela FAO em 1977 (FAO 24) foram submetidos a uma revisão feita por especialistas em evapotranspiração, os quais chegaram à conclusão de que o método de Penman-Monteith parametrizado para grama com 12 cm de altura, resistência aerodinâmica da superfície de 70 sm^{-1} e albedo de 0,23 apresentava melhores resultados, passando a ser recomendado pela FAO como método padrão para estimativa da ETo.

Uma maneira freqüentemente utilizada para verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) é por meio da comparação destes com o do Penman-Monteith, parametrizado pela FAO.

Freqüentemente, nos métodos de estimativa da ETo, é necessário conhecer uma grandeza (ETo) que é composta de diferentes variáveis e que não pode ser medida diretamente, ou seja, essa grandeza é calculada por uma expressão matemática a partir dos valores obtidos para cada variável da expressão. Existe, então, o problema de especificar o erro dessa grandeza obtida com a combinação de outras, decorrentes dos instrumentos de medidas utilizados. Percebe-se com facilidade que esse erro provém da combinação dos erros das variáveis utilizadas no cálculo da grandeza procurada (Turco et al., 1994).

Se considerarmos o erro da estimativa da ETo, a avaliação da eficiência dos métodos para a estimativa da ETo se torna mais consistente e ajustada, otimizando a eficiência da irrigação e manejo da água.

Inúmeros são os trabalhos que estudam métodos de estimativa da ETo. Foram selecionamos os mais recentes e que se identificam com o propósito desse trabalho.

Abteu e Obeysekera (1995) estudaram a evapotranspiração de tabôa (*Typha domingensis*) no sul da Flórida. Compararam o método de medida por lisímetro com os seguintes métodos de estimativa: Penman-Monteith, Penman e Priestley-Taylor. Verificaram que o método de Penman-Monteith apresentou melhor correlação.

Dantas Neto (1999) avaliou métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró, RN. Os valores diários da ETo foram comparados com a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith. Os resultados evidenciaram um melhor ajuste pelo método de

Penman seguido da Radiação Solar, Blaney-Criddle, Hargreaves e Samani e, por último, o método do Tanque Classe A.

Estudando a evapotranspiração de referência diária com dados de nove estações climatológicas, localizadas na bacia do Rio Verde Grande, situada ao Norte do estado de MG, Faria, et al. (2000) compararam a ETo estimada pelas equações ajustadas para os métodos de Hargreaves, Penman e Radiação Solar em relação ao método de Penman-Monteith. Observaram um ajuste satisfatório, com r^2 superiores a 80%, com exceção do método de Hargreaves, que obteve, em duas localidades, r^2 inferior a 50%.

Fernandes (2001), utilizando dados coletados em uma estação climatológica automatizada instalada em uma área cultivada com soja verificou que as evapotranspirações reais, calculadas pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado, mostraram correlações altamente significativas entre si e com o método de Penman-Monteith.

Santiago et al. (2002) observaram em seu experimento com evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman – Monteith (FAO – 56) em escala mensal e decenal, que mesmo com as dificuldades de mensuração lisimétrica da ETo a performance da parametrização proposta pelo FAO para a equação de Penman – Monteith pode ser considerada adequada para estimativas mensais e decenais. Vescove (2005), para comparar diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, utilizou dados coletados de uma estação meteorológica automatizada instalada em área experimental de uma fazenda plantada com a cultura de citros. Observou que método do Tanque Classe A superestimou a evapotranspiração de referência em 26% no período verão-outono e 24% no período inverno-primavera em relação ao método padrão da FAO, Penman-Monteith.

Não foi encontrada literatura que trata do estudo da influência da acurácia de instrumentos de medidas na avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo).

A fim de contribuir com estudos desta natureza, foi desenvolvido este trabalho, o qual teve como objetivo avaliar quatro métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar), comparando-os com o método de Penman-Monteith, que é recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) como método padrão para estimativa da ETo, estimados para Jaboticabal, SP. Para essa avaliação foram considerados os erros da estimativa da ETo, em função da combinação dos erros das variáveis que entram nas equações de estimativa, erros estes decorrentes dos instrumentos de medidas utilizados para obtenção dessas variáveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Campus de Jaboticabal, SP, situada a 21°14'05" de latitude Sul, 48°17'09" de longitude Oeste e altitude de 613,68 m. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa. A área experimental foi plantada grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), cobrindo totalmente o solo, onde foram efetuadas irrigações para manter o solo em boas condições hídricas.

Para obtenção dos dados meteorológicos, foi instalada na área experimental uma estação meteorológica automatizada. A estação possui um Sistema de Aquisição de Dados (CR10X Measurement and Control System) da marca Campbell Scientific, Inc, onde todos os sensores foram conectados por meio de cabos.

A estação foi instalada na área experimental em 2 de janeiro de 2001. A partir de 3 de janeiro, os dados começaram a ser registrados no sistema de aquisição de dados.

A radiação solar global foi obtida por intermédio de um piranômetro marca Eppley, modelo 8-48, com compensação de temperatura, constante de calibração de $12,80 \cdot 10^{-6} \text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$ e acurácia $\pm 33 \text{ W m}^{-2}$. Esse sensor foi fixado sobre uma plataforma de alumínio que o manteve na horizontal, 1,5 m acima da superfície gramada.

O saldo de radiação foi obtido com um radiômetro líquido marca Rebs (modelo: Q-7.1, Net Radiometer), com cúpulas de polietileno e colocado na horizontal a 1,5 m acima da superfície gramada. Esse equipamento possui uma constante de calibração para valores positivos de $8,6 \text{ W m}^{-2} \text{mV}^{-1}$ e para valores negativos $13,09 \text{ W m}^{-2} \text{mV}^{-1}$, acurácia para valores positivos de $\pm 39 \text{ W m}^{-2}$ e uma resposta espectral de 0,25 a 60 μm .

A temperatura e umidade relativa do ar foram obtidas com um psicrômetro de termopares do tipo T desenvolvido por Turco & Fernandes (2001). O sensor foi colocado a 1,5 m acima da superfície gramada. A temperatura foi obtida com uma acurácia de $\pm 1^\circ\text{C}$ e a umidade relativa com $\pm 2\%$. Os termopares tipo T foram conectados em duas entradas do Datalogger programadas como diferencial e fundo de escala igual a 2,2 mV.

A velocidade do vento foi obtida por meio de um Anemômetro (R.M. Young Co) modelo: 03001, com limite de funcionamento entre 0,2 a 50 m s^{-1} e acurácia de $\pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$. O anemômetro foi instalado à altura de 2 m da superfície gramada.

Para a obtenção da evaporação do tanque, foi instalado na área experimental um tanque Classe A conforme especificações do Serviço Meteorológico Norte Americano (U.S.W.B). Foi utilizado, para medida, um parafuso micrométrico com acurácia de 0,02 mm.

Para atingir o objetivo desse trabalho, foi utilizada a técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, descrita por Turco et al. (1994), nos seguintes métodos de estimativa da ETo: Makkink (1957), Hargreaves (1976), Tanque Classe A (Doorenbos & Pruitt, 1977), Radiação Solar (Doorenbos & Pruitt, 1977) e Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Para isso, foi realizado um tratamento matemático na equação original desses métodos. A seguir, é descrita a equação original dos métodos utilizados e o tratamento matemático realizado.

Método Makkink

Seja,

$$E_{ToM} = (0,61 Q W) - 0,12 \quad (1)$$

a equação básica proposta por Makkink (1957) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

E_{ToM} = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia^{-1} ;

Q = radiação solar global medida ou estimada, $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

W = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na ETo, para diferentes valores de temperatura e altitude (Villa Nova & Reichardt, 1989).

Pode-se escrever a eq. (1) na seguinte forma:

$$E_{ToM} = (0,61 \frac{Q}{59} W) - 0,12 \quad (2)$$

na qual,

Q = radiação global recebida, $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

$1/59$ = fator de conversão de cal cm^{-2} a mm de evaporação equivalente.

Admitindo-se por hipótese que:

$$W = K_a T \quad (3)$$

na qual,

K_a = constante calculada por meio de diferentes valores de W e T .
Substituindo a eq. (3) na (2) tem-se:

$$ET_oM = \left(\frac{K_a \ 0,61}{59} Q \ T \right) - 0,12 \quad (4)$$

e considerando que:

$$K_b = \frac{K_a \ 0,61}{59}$$

tem-se:

$$ET_oM = K_b Q T - 0,12 \quad (5)$$

Método de Hargreaves

Seja,

$$ET_oH = 0,0075 Q T \quad (6)$$

a equação básica proposta por Hargreaves (1976) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

ET_oH = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

T = temperatura média do ar, °F;

Q = radiação solar global medida ou estimada, cal cm⁻² dia⁻¹.

Pode-se escrever a eq. (6) na seguinte forma:

$$ET_oH = 0,0075 \frac{Q}{59} T \quad (7)$$

na qual,

Q = radiação solar global recebida, cal cm⁻² dia⁻¹;

1/59 = fator de conversão de cal cm⁻² a mm de evaporação equivalente.

Considerando que:

$$K_b = \frac{0,0075}{59}$$

tem-se:

$$ET_oH = K_b Q T \quad (8)$$

Método do Tanque Classe A

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, Doorenbos & Pruitt (1977) propõem a seguinte equação:

$$ET_o = K_p ECA \quad (9)$$

na qual,

ET_o = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

ECA = evaporação observada no tanque Classe A, mm dia⁻¹;

K_p = coeficiente do tanque.

Para o cálculo de K_p , foi utilizada a equação proposta por SNYDER (1992), descrita a seguir:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \text{Ln}(F) - 0,000376 V + 0,0045 U \quad (10)$$

na qual,

F = distância (tamanho) da área de bordadura, m (adotado $F = 10\text{m}$);

V = Velocidade do vento, km dia⁻¹;

U = umidade relativa média do ar, %.

Substituindo a equação (10) na (9) temos:

$$ET_o = 0,5373 \text{ ECA} - 0,0004 \text{ ECA V} + 0,0045 \text{ ECA U} \quad (11)$$

Método da Radiação Solar

Seja,

$$ET_o = C W Q \quad (12)$$

a equação básica proposta por Doorenbos & Pruitt (1977) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

ET_o = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

C = coeficiente angular de regressão $ET_o \times W Q$, determinado em função da umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento a 2 m de altura (Villa Nova & Reichardt, 1989);

W = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na ET_o , para diferentes valores de temperatura e altitude (Villa Nova & Reichardt, 1989);

Q = radiação solar global medida ou estimada, cal cm⁻² dia⁻¹.

Pode-se escrever a eq. (12) na seguinte forma:

$$ET_o = \frac{C W Q}{59} \quad (13)$$

na qual,

ET_o = evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹;

Q = radiação global recebida, cal.cm⁻² dia⁻¹;

1/59 = fator de conversão de cal cm⁻² a mm de evaporação equivalente.

Admitindo-se por hipótese que:

$$C = K_a U V \quad (14)$$

$$W = K_b T \quad (15)$$

na qual,

K_a = constante calculada por meio de diferentes valores de C , U e V ;

K_b = constante calculada por meio de diferentes valores de W e T ;

U = umidade relativa média do ar, %;

V = velocidade média do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C.

Substituindo as eq. (14) e (15) na (13), tem-se:

$$ET_o = \frac{K_a K_b}{59} U V T Q$$

Considerando que:

$$K_c = \frac{K_a K_b}{59}$$

tem-se:

$$ET_o = K_c U V T Q \quad (16)$$

Método do Penman-Monteith (PM)

Para o cálculo da evapotranspiração potencial Allen et al.(1998) propuseram a seguinte equação:

$$ET_o(PM) = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) V (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 V)} \quad (17)$$

na qual,

$ET_o(PM)$ = evapotranspiração de referência pelo método de PM, em gramado, mm d⁻¹;

R_n = radiação líquida, MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;
 T = temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$;
 V = velocidade média do vento a 2m de altura, m s^{-1} ;
 $(e_s - e)$ = déficit de pressão de vapor, kPa ;
 Δ = tangente à curva de pressão de vapor em relação a temperatura, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 γ = coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 900 = fator de conversão.

A pressão atual do vapor da água do ar é expressa por:

$$e = (U/100) e_s \quad (18)$$

na qual,

e = pressão atual do vapor da água do ar, kPa ;
 e_s = pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco, kPa ;
 U = umidade relativa média do ar, %.

A pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco é determinada pela equação:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \quad (19)$$

A curva de pressão de vapor é determinada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (20)$$

Substituindo as equações (18), (19) e (20) na (17), temos:

$$ET_o = \frac{1021,247827 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) Rn}{(T + 237,3)^2} + 36,666324 \frac{V \left(\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) - \frac{1}{100} U \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \right)}{T + 273}}{2503,0584 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} + 0,0667 + 0,022678 V} \quad (21)$$

Para análise dos resultados desse trabalho, considerando os erros da ET_o , foram utilizadas as metodologias de VUOLO (1996), descritas a seguir:

a) Transferência do erro da variável independente para a variável dependente.

Quando relacionamos diariamente a ET_{oPM} com a ET_o (métodos) ocorre que uma grandeza y é medida em função de uma variável x considerada como independente ($y = f(x)$). Entretanto, ambas as grandezas têm erros e, portanto, devem ser associadas incertezas às duas variáveis:

$$x \longrightarrow \sigma_x \quad y \longrightarrow \sigma_{y_o}$$

Na análise da dependência entre y e x , é desnecessário admitir incertezas nas duas variáveis. Isto é, geralmente, não interessa conhecer os valores verdadeiros de x e y em cada caso, mas interessa conhecer a relação verdadeira entre x e y . Por isso, pode-se admitir que o resultado x é o valor verdadeiro, mas y tem incerteza maior σ_y , dada por:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_o}^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_o^2 \sigma_x^2, \quad (22)$$

em que $(dy/dx)_o$ é uma estimativa preliminar da derivada (dy/dx) . A variância σ_y^2 é a variância original $\sigma_{y_o}^2$ somada a uma variância $(\frac{dy}{dx})_o^2 \sigma_x^2$ que representa a incerteza transferida de x para y .

b) Método dos mínimos quadrados

Quando relacionamos diariamente os métodos estudados em relação ao PM temos duas variáveis, x e y . Os resultados das medidas são chamados pontos experimentais, pois cada par de valores de x e y pode ser representado como um ponto no gráfico x, y . Um conjunto de pontos experimentais pode ser indicado por $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$, onde x_i é admitida como variável independente, sendo considerada isenta de erros (**item a**), enquanto que a incerteza estatística na variável y_i é dada pelo desvio padrão σ_i .

Um problema fundamental é obter a melhor função $f(x)$ para descrever o conjunto de pontos experimentais obtido em medidas das grandezas x e y . O problema de ajustar a melhor função $f(x)$ a um conjunto de pontos experimentais só pode ser resolvido a partir de um critério que defina objetivamente qual é a melhor função. O critério utilizado foi o método dos mínimos quadrados para ajuste da função $f(x)$ ao conjunto de pontos experimentais.

No método dos mínimos quadrados, a função $f(x)$ deve ser determinada a partir de uma função geral $f(x; a_1, a_2, \dots, a_n)$ previamente escolhida. Isto é, a função $f(x)$ tem forma e número de parâmetros predeterminados.

Por exemplo, a função geral a ser ajustada pode ser escolhida como um polinômio de 2º grau:

$$f(x; a_1, a_2, a_3) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2$$

e o método dos mínimos quadrados permite determinar os melhores valores para a_1, a_2, a_3 .

Foi utilizada a função $f(x, a_1, a_2) = a_1 + a_2 x$ em que foram determinados os valores para a_1 e a_2 . Essa função é de grau 1 (m) e número de parâmetros igual a 2 ($p = m+1$).

A seguir, são apresentadas as expressões para ajuste de uma reta para um conjunto de pontos experimentais $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$, em que σ_i é a incerteza em y_1 e as medidas x_i são supostas isentas de erro, conforme método dos mínimos quadrados.

A equação geral da reta é:

$$y = ax + b. \tag{23}$$

O problema consiste em determinar os parâmetros a e b . A reta é um exemplo simples de função linear em relação aos parâmetros:

$$f(x, a_1, a_2) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x), \tag{24}$$

na qual

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x, & f_2(x) &= 1, \\ a_1 &= a & \text{e} & a_2 = b. \end{aligned} \tag{25}$$

Assim, conforme o método dos mínimos quadrados, os melhores valores para a e b são calculados por meio da solução da seguinte equação na forma matricial, para ajuste de função linear aos parâmetros:

$$A = M^{-1} B \tag{26}$$

na qual

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i f_1 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i f_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i \end{bmatrix}$$

e

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

A matriz M pode ser escrita com notação mais simples:

$$M = \begin{bmatrix} S_{x^2} & S_x \\ S_x & S_{\sigma} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

em que

$$S_{\sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad S_x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2}, \quad S_{x^2} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2},$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2}, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}. \quad (29)$$

A matriz M^{-1} é dada por

$$M^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} S_{\sigma} & -S_x \\ -S_x & S_{x^2} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

em que

$$\Delta = (S_{\sigma} S_{x^2} - S_x^2). \quad (31)$$

Assim, os melhores valores para a e b dados por (32) são:

$$a = \frac{1}{\Delta} (S_{\sigma} S_{xy} - S_x S_y) \quad \text{e} \quad (32)$$

$$b = \frac{1}{\Delta} (S_{x^2} S_y - S_x S_{xy}). \quad (33)$$

c) Avaliação da qualidade de um ajuste

Um critério de avaliação da qualidade do ajuste é essencialmente um método para se determinar se a curva ajustada foi boa em relação aos pontos experimentais. O critério utilizado para avaliação da qualidade de ajuste foi o Teste de X^2 reduzido, descrito a seguir.

Indicando por $f(x)$ a função ajustada a um conjunto de n pontos experimentais $(x_i; y_i, \sigma_i)$, a quantidade X^2 (estatístico) é definido como

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2}. \quad (34)$$

A quantidade X^2 (reduzido), é definida como:

$$X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu}, \quad (35)$$

em que ν é o número de graus de liberdade do ajuste. Como n é o número de pontos e p é o número de parâmetros ajustados, $\nu = (n-p)$.

Após a obtenção dos X_{red}^2 , a avaliação da qualidade de ajuste foi feita por meio do gráfico que relaciona ν com X_{red}^2 (Figura 1). Esse gráfico permite obter, para cada ν , um intervalo de confiança $P = 98\%$, para os valores de X_{red}^2 .

No gráfico de VUOLO (1996), os valores de ν vão até 160 e, entretanto, em nosso trabalho, $\nu = 269$. Foram feitos os seguintes procedimentos para determinar o X_{red}^2 (1% e 99%):

- PROGRAMA MICROSOFT EXCEL / FUNÇÃO ESTATÍSTICA / INV.QUI para $\nu = 269$ e 1% é obtido $X^2 = 325,88$; portanto $X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu} = 1,21$

- PROGRAMA MICROSOFT EXCEL / FUNÇÃO ESTATÍSTICA / INV.QUI para $\nu = 269$ e 99% é obtido $X^2 = 217,99$; portanto $X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu} = 0,81$.

Pode-se afirmar com 98% de confiança que: $0,81 < X_{red}^2 < 1,21$

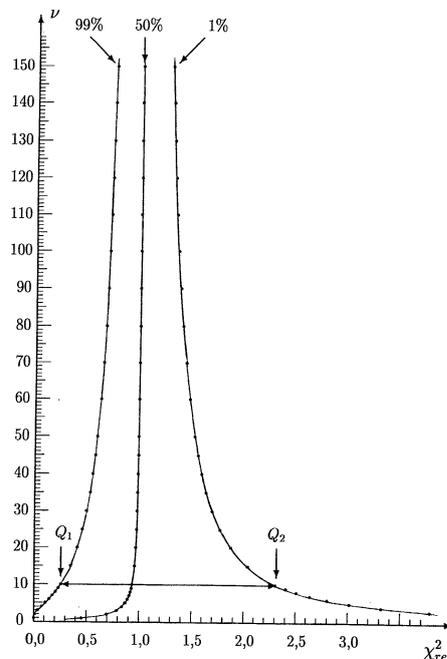


Figura 1. Gráfico que relaciona ν com X_{red}^2 (Vuolo, 1996).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O erro diário associado à estimativa da ET_oP foi obtido aplicando-se a técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, descrita por Turco et al. (1994), no período de janeiro a dezembro de 2001. Da mesma forma, foram obtidos os erros diários ($\pm\Delta ET_oM$, $\pm\Delta ET_oH$, $\pm\Delta ET_oT$, $\pm\Delta ET_oR$) associados às estimativas da ET_oM , ET_oH , ET_oT e ET_oR , utilizando-se a técnica citada.

A Figura 2, mostra os valores médios mensais da $ET_o \pm \Delta ET_o$ para os métodos de Penman e Makkink. As acurácias dos instrumentos de medidas da temperatura do ar (T), velocidade do vento (V), umidade relativa (U) e radiação líquida (Rn) causaram na ET_oP erros $\pm\Delta ET_oP$. As acurácias dos instrumentos de medidas da radiação global (Q) e temperatura do ar (T) causaram na ET_oM erros $\pm\Delta ET_oM$. Verifica-se na Figura 2 que os instrumentos de medidas utilizados para obtenção da ET_oP causaram erros maiores ($\pm\Delta ET_oP$) do que os utilizados para obtenção da ET_oM com erros $\pm\Delta ET_oM$, para todos os meses avaliados. Com esses dados, não dá para se ter noção em até que ponto esses erros associados às grandezas ET_o comprometeram a comparação dos dois métodos. Por isso, foi aplicado o método dos mínimos quadrados para se determinar os parâmetros da equação de uma reta que leva em consideração os erros ($\pm\Delta ET_o$) e o teste do qui-quadrado reduzido para avaliação da qualidade do ajuste.

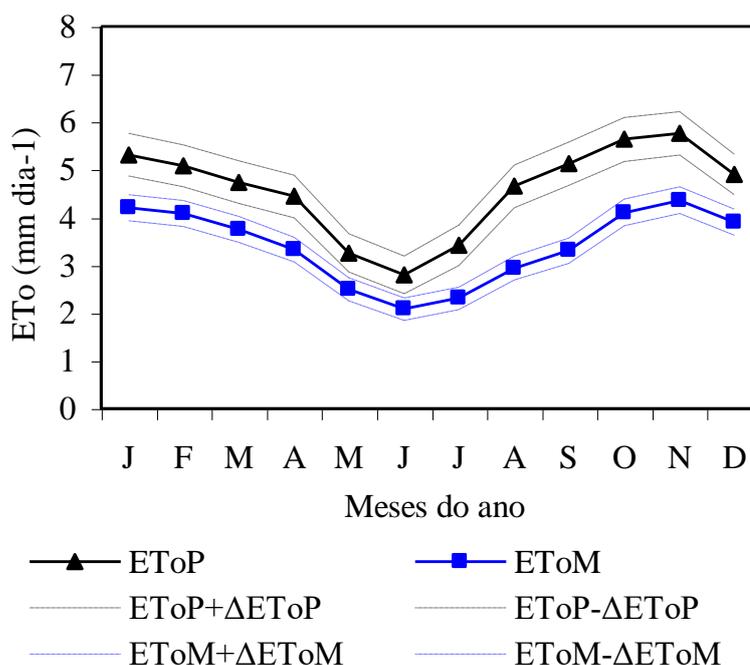


Figura 2. Valores médios mensais da $ET_o \pm \Delta ET_o$, para os métodos Penman-Monteith e Makkink.

Na Figura 3, temos os valores médios mensais de $ET_o \pm \Delta ET_o$ para o método de Penman-Monteith e Hargreaves. Observa-se que os resultados obtidos são praticamente iguais ao método de Makkink, pois os dois métodos utilizam os mesmos instrumentos de medidas (Q,T), e o que difere entre eles é a equação geral para determinação da ET_o .

Os valores médios mensais de $ET_o \pm \Delta ET_o$ para os métodos de Penman-Monteith e Tanque Classe A são mostrados na Figura 4. A acurácia dos instrumentos de medidas da

evaporação observada no tanque (ECA), velocidade do vento (V) e umidade relativa (U) causaram na ET_oT erros $\pm\Delta ET_oT$. Os instrumentos de medidas utilizados para obtenção da ET_oT causaram erros menores ($\pm\Delta ET_oT$) do que os utilizados para a obtenção da ET_oM e ET_oH . Isso ocorreu devido ao fato de que o método do Tanque Classe A tem equação diferente da ET_oM e ET_oH e é dependente de grandezas diferentes (ECA, V, U).

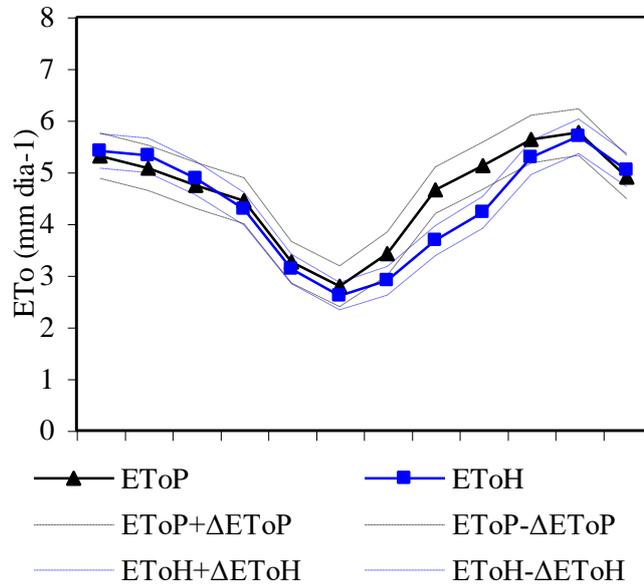


Figura 3. Valores médios mensais da $ET_o\pm\Delta ET_o$, para os métodos Penman-Monteith e Hargreaves .

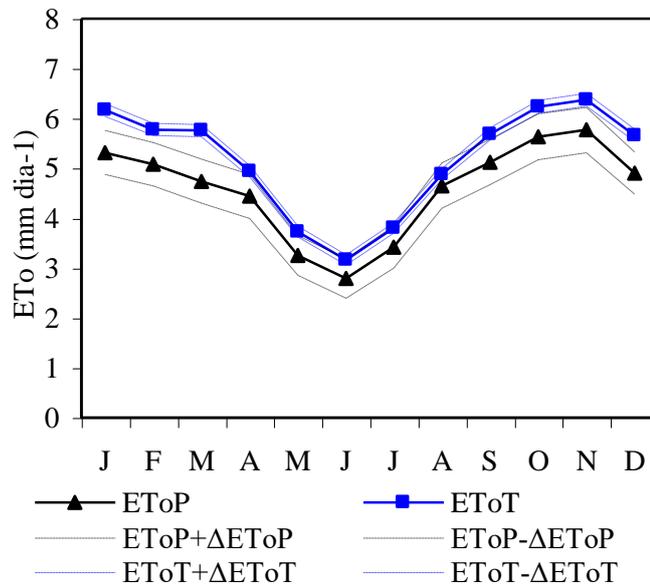


Figura 4. Valores médios mensais da $ET_o\pm\Delta ET_o$, para os métodos Penman-Monteith e Tanque Classe A.

Na figura 5, são apresentados os valores médios mensais de $ET_o \pm \Delta ET_o$ para os métodos de Penman-Monteith e Radiação Solar. A acurácia dos instrumentos de medidas da umidade relativa (U), velocidade do vento (V), temperatura (T) e Radiação Solar Global (Q) causaram na ET_oR erros ($\pm \Delta ET_oR$). Os instrumentos de medidas utilizados causaram erros maiores ($\pm \Delta ET_oR$) do que os utilizados para obtenção de ET_oM , ET_oH e ET_oT ; além disso, causaram erros maiores do que para obtenção da ET_oP .

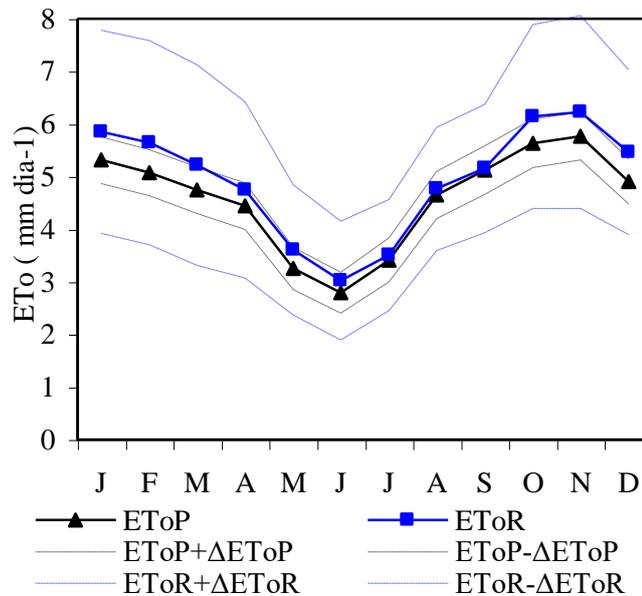


Figura 5. Valores médios mensais da $ET_o \pm \Delta ET_o$, para os métodos Penman-Monteith e Radiação Solar.

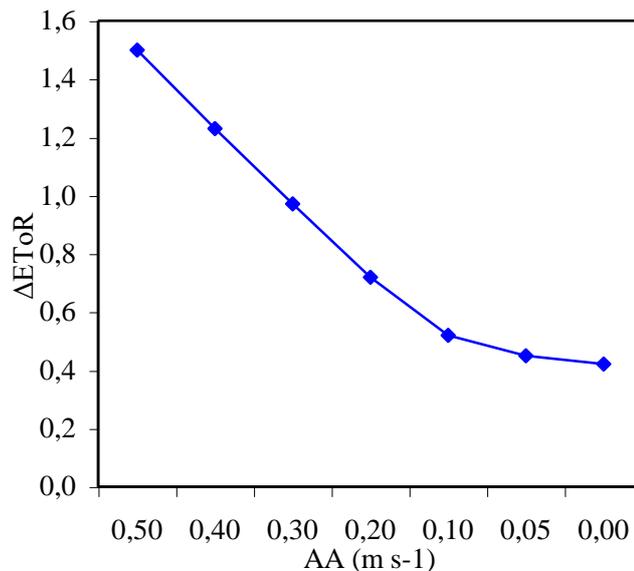


Figura 6. Variação da acurácia do anemômetro (AA) em função da média do erro ΔET_oR .

Todos os instrumentos de medidas citados contribuirão para causar erros ($\pm\Delta\text{EToR}$), mas o que teve a maior influência foi o utilizado para obter a velocidade do vento (anemômetro). Na Figura 6, verifica-se a variação da acurácia do anemômetro em função da média dos erros ΔEToR para o período de 271 dias. Nota-se, nessa figura, que utilizando-se um anemômetro com acurácia de $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$ causaria um erro na EToR próximo aos erros causados pelos outros instrumentos de medidas utilizados. Portanto, deve-se usar um anemômetro com maior acurácia na estação meteorológica automatizada para determinar ETo pelo método da Radiação Solar.

A seguir, são apresentadas as equações das retas ($y = a x + b$), com os parâmetros a e b obtidos por meio do método dos mínimos quadrados, que relacionam diariamente os métodos estudados em relação ao PM e respectivas incertezas.

$$\text{EToP} = 1,2116 \text{ EToM} + 0,5 \quad (36)$$

$$\text{EToP} = 0,9195 \text{ EToH} + 0,6097 \quad (37)$$

$$\text{EToP} = 0,7823 \text{ EToT} + 0,5373 \quad (38)$$

$$\text{EToP} = 0,881 \text{ EToR} + 0,3228 \quad (39)$$

Não se realiza uma análise dessas equações para se verificar qual o método que melhor se ajustou ao EToP , pois essas equações foram impostas, determinando-se seus parâmetros. Necessita-se saber se essas equações são os melhores ajustes aos pontos experimentais $\{x_1, y_1, \sigma_1\}$, $\{x_2, y_2, \sigma_2\}$, ..., $\{x_i, y_i, \sigma_i\}$, ..., $\{x_n, y_n, \sigma_n\}$. Para isso, foi determinado o valor do qui-quadrado reduzido.

As Figuras 7, 8, 9, 10 apresentam as retas $y = ax + b$ ajustadas aos pontos experimentais, obtidos diariamente pelos métodos estudados, em relação ao método de Penman-Monteith e respectivas incertezas.

No ajuste da reta da Figura 7, $\nu = 269$ e $\chi_{red}^2 = 0,68$. Este valor de χ_{red}^2 está fora da faixa de valores aceitáveis para o qui-quadrado reduzido (Figura 1), significando que o ajuste não é bom. Assim, é provável que a reta seja uma função inadequada para ser ajustada aos pontos experimentais. Portanto, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Makkink são distintos e não podem ser comparados.

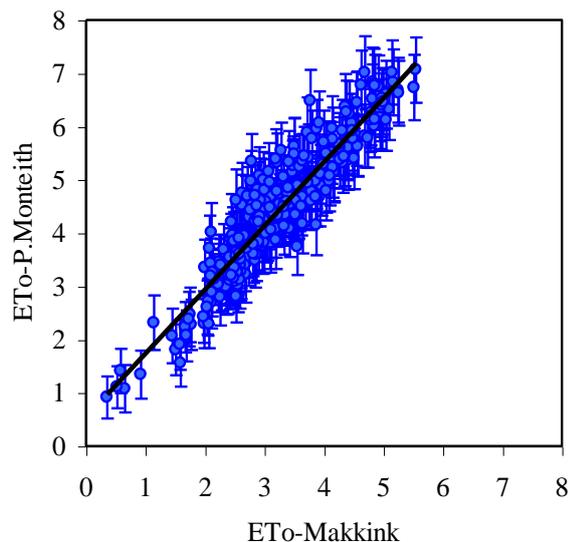


Figura 7. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo , obtidos pelo método de Makkink, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

No ajuste da reta da Figura 8, $\nu = 269$ e $\chi_{red}^2 = 0,9$. Como pode ser visto na Figura 1, esse valor de qui-quadrado reduzido está bem dentro da faixa de valores aceitáveis para χ_{red}^2 e o ajuste pode ser considerado bom. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Hargreaves não são distintos, portanto, podem ser comparados.

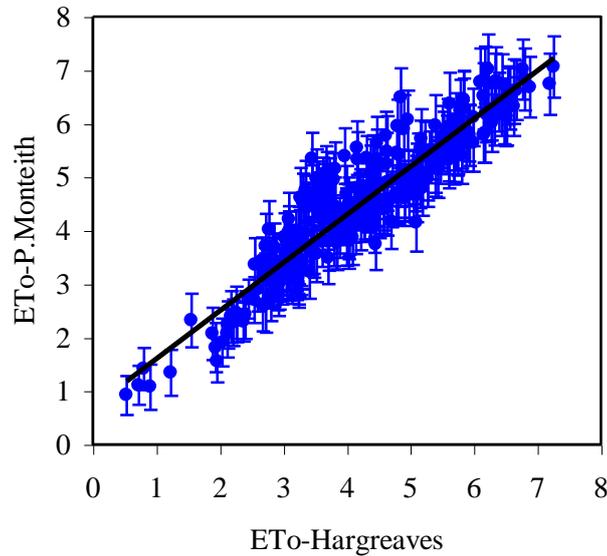


Figura 8. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos pelo método de Hargreaves, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

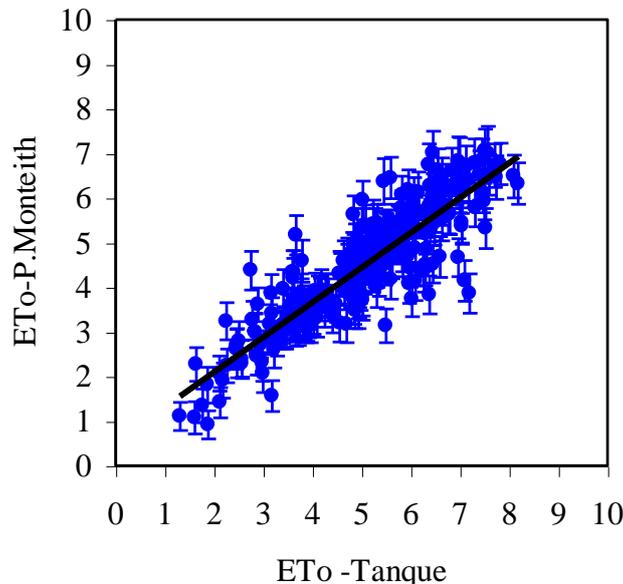


Figura 9. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos pelo método do Tanque Classe A, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

No ajuste da reta da Figura 9, $\nu = 269$ e $\chi_{red}^2 = 1,86$. Esse valor de χ_{red}^2 está fora da faixa de valores aceitáveis para χ_{red}^2 (Figura 8), significando que o ajuste não é satisfatório do ponto de vista de qualidade de ajuste. Evidentemente, existe uma chance extremamente pequena ($\lll 1\%$) de que isto tenha ocorrido por causa de flutuações estatísticas excepcionais. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, de que os métodos de Penman-Monteith e Tanque Classe A são distintos, portanto, não podendo ser comparados.

No ajuste da reta da Figura 10, $\nu = 269$ e $\chi_{red}^2 = 0,07$. Esse valor de χ_{red}^2 também está fora da faixa de valores aceitáveis para χ_{red}^2 (Figura 8), indicando que o ajuste é ruim. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Radiação Solar são distintos, portanto, não podendo ser comparados.

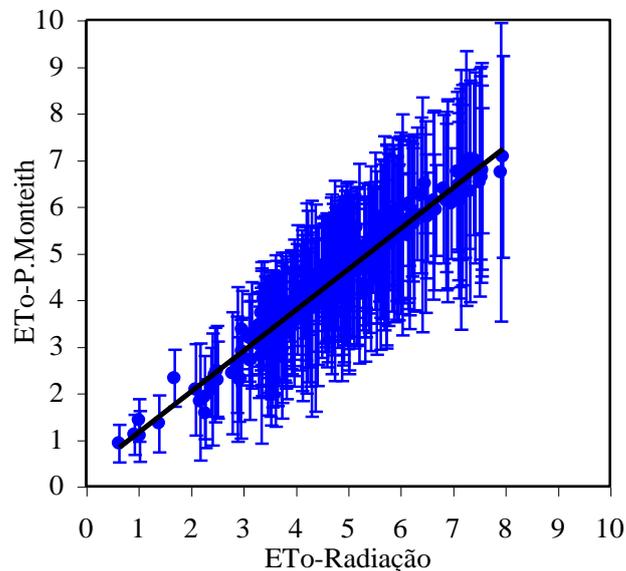


Figura 10. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Radiação Solar, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

6 CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi desenvolvido, destacam-se as seguintes conclusões:

O resultado da avaliação dos métodos, considerando os erros da ETo devido à utilização de Instrumentos de medidas, indica um melhor ajuste para estimativa da ETo, considerando o método de Penman-Monteith como padrão, para o método de Hargreaves.

Os métodos de Makkink, Tanque Classe A e Radiação Solar são diferentes do Penman-Monteith, ou seja, quando foi aplicada a metodologia de análise dos dados considerando os erros da ETo não se estabeleceu uma relação linear. Portanto, não podem ser comparados.

7 AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio concedido.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTEW, W.; OBEYSEKERA, J. Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.1, p.121-129, 1995.

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).

DANTAS NETO, F.S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró – RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.7, n.1, p.46-55, 1999.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

FARIA, F. J.; CARVALHO, D. F.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, M. A. A. Influência do método de estimativa na demanda de irrigação suplementar para o milho (*Zea mays* L.), na bacia do rio verde grande (MG) **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, p. 187-196, 2000. Edição Especial.

FERNANDES, E. J. **Determinação da evapotranspiração real pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado**. 2001. 125 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

HARGREAVES, G.H. **Climate and irrigation requirements for Brazil**. Logan, Utah State University, 1976. 44p.

MAKKINK, G.H. Ekzamenno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Wageningen, v.5, p.290-305, 1957.

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 (FAO – 56) nas escalas mensal e decendial. **Revista Brasileira de Agrometereologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.57-66, 2002.

SENA, A. E. S.; SOUZA, F. Avaliação técnica da irrigação por aspersão na cultura do CAUPI, vigna unguiculata (L) Walp. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 45, p. 25 – 33, 1991.

SNYDER, R.L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.118, p.977-980, 1992.

SOUZA, J. A. A.; CORDEIRO, E. A.; MEDEIROS, S. S.; NETO, D. E.; RAMOS, M. M. Efeito da uniformidade de distribuição de água no consumo de água e de energia em um sistema de irrigação do tipo gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. 1 CD - ROM.

TURCO, J.E.P.; PINOTTI JR, M.; PAVANI, L.C.; FERNANDES, E.J. Técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Engenharia Agrícola**, Campinas, v.14, p.29-37, 1994.

VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E.P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara - SP. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721, 2005.

VILLA NOVA, N.A., REICHARDT, K. Evaporação e Evapotranspiração. In: RAMOS, F., OCCHIPINTI, A.G., VILA NOVA, N.A., REICHARDT, K., MAGALHÃES, P.C., CLEARY, R.W. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH Editora UFRJ, 1989. p.145-97.

VUOLO, J.E. **Fundamentos da teoria de erros**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. 249p.