

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ANÁLISE DE TRÊS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO
DE PRADÓPOLIS – SP**

Graciano Augusto Peviani Balotta

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Dissertação a ser apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Novembro de 2011

O48f Balotta, Graciano Augusto Peviani
Análise de três métodos de estimativa da evapotranspiração de
referência para a região de Pradópolis - SP / Graciano Augusto
Peviani Balotta. — — Jaboticabal, 2011
x, 35 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011
Orientadora: José Eduardo Pitelli Turco
Banca examinadora: Adhemar Pitelli Milani, Renato Farias do Valle
Junior
Bibliografia

1. *Evapotranspiração*. 2. Instrumento de Medida. 3. Acurácia. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.34:631.54

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

GRACIANO AUGUSTO PEVIANI

BALOTTA - nascido em 12 de abril de 1985 em São Paulo, SP é Engenheiro Agrônomo formado em dezembro de 2008 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da Universidade Estadual Paulista - UNESP – Campus de Jaboticabal. Iniciou o curso de mestrado em março de 2009 e terminou em novembro de 2011.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

Dedicado aos meus pais Graciano e Regina e minhas irmãs Andrea e Márcia

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me auxiliado nessa grande jornada e ter colocado pessoas boas nela.

Agradeço à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista e a todos do programa de pós graduação por me conceder todo apoio e estrutura para meus estudos

Ao meu grande orientador **Prof Dr José Eduardo Pitelli Turco**, pela grande paciência, e por tudo que me ensinou.

A minha namorada **Verônica** e seus país e irmão **Sr Edelson ,Dona Eloisa e Italo** pelo carinho, paixão e ajuda em todos os momentos

A todos os funcionários da instituição que diretamente ou indiretamente contribuíram com a minha formação

A todos meus amigos, em especial ao **André Marcos Santana (Moreno)** por todo apoio

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
SUMMARY	iii
I.INTRODUÇÃO.....	4
II. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
III. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
Método Makkink.....	9
Método de Hargreaves.....	10
Método da Radiação Solar.....	11
Método do Penman-Monteih.....	12
Transferência do erro variável independente para a variável dependente.....	14
Método dos mínimos quadrados.....	14
Avaliação da qualidade de um ajuste.....	17
IV. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	19
V.CONCLUSÃO.....	27
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

ANÁLISE DE TRÊS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE PRADÓPOLIS - SP

RESUMO - O objetivo desse trabalho foi avaliar três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Hargreaves, Radiação Solar e Makkink), 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 ET_0 , para o município de Pradópolis - SP. Para esse fim foi instalada no posto agrometeorológico da cidade de Pradópolis - SP uma estação meteorológica automatizada. Por intermédio desta estação foram obtidas medidas da radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A análise dos resultados foi feita por uma técnica que considera os erros da ET_0 . O resultado da avaliação dos métodos indica um melhor ajuste para estimativa da ET_0 para o método de Hargreaves. Os métodos de Makkink e Radiação Solar não obtiveram um ajuste satisfatório com o do Penman-Monteith. Para avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração deve-se considerar os erros da estimativa da ET_0 , evitando possíveis erros de avaliação.

PALAVRAS-CHAVE: instrumentos de medidas; acurácia; evapotranspiração.

APPLICATION OF TREE METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN CRISTALINA REGION PRADÓPOLIS - SP, USING A TECHNIQUE THAT CONSIDERS THE ERRORS OF ETo

SUMMARY - The aim of this investigation was to evaluate two reference methods to Monteith method, recommended by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) as the standard method for estimating ETo in Pradópolis - SP. To this data collection, an automated weather station was installed in the meteorological station at Pradópolis - SP. Through estimate evapotranspiration (Hargreaves, Radiation and Makkink), compared to Penman-this station, we obtained measures of global solar radiation, air temperature, relative humidity and wind speed. The analysis was done by a technique that considers the mistakes of ETo , which depends on the combination of the errors of the variables that make up the estimating equations, derived from the measurement instruments used to obtain these variables. The aftermath showed a better adjustment to Hargreaves. Makkink, 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: measurement instruments, accuracy, evapotranspiration.

I. INTRODUÇÃO

A Agricultura irrigada se apresenta, atualmente, como grande alternativa econômica para o Brasil, assim é necessário que os recursos hídricos disponíveis sejam usados de forma racional, por meio de técnicas apropriadas de manejo de água, do solo e de cultivos. O uso eficiente de água na agricultura irrigada é essencial, face à escassez dos recursos hídricos e o elevado custo dos insumos, o que torna imperativo a utilização de metodologias apropriadas para o planejamento e administração da irrigação, por ficar mais evidente a necessidade da combinação correta dos diversos fatores que possibilitem a determinação do volume de água a ser aplicado ao solo em cada regime de irrigação, com base no conhecimento da demanda atmosférica MOREIRA (1993).

Na administração da irrigação exige um conhecimento grande de manejo de água, no qual as culturas e o local no qual está inserida é fator variável de manejo. A irrigação tem como objetivo suprir a necessidade de água da cultura.

Para determinar o quanto de água está sendo perdido por evaporação e transpiração, é necessária a utilização de métodos que permitam estimar essas perdas que serão repostas via irrigação, caso a precipitação não sejam suficiente para suprir as necessidades da cultura. Essa perda global é denominada de evapotranspiração, que pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para a atmosfera, incluindo a evaporação da água do solo diretamente e o processo de transpiração dos tecidos vegetais VESCOVE & TURCO (2005).

A evapotranspiração pode ser expressa como a quantidade equivalente de água evaporada por unidade de tempo, geralmente expressa como Lâmina de água por unidade de tempo (mm dia^{-1}) (BURMAN et al, 1983). O Cálculo diário da evapotranspiração de referência (ET_o) é a base para se determinar o valor da lâmina

de irrigação a ser aplicada. O Método de Penman Monteith-FAO é considerado padrão para o cálculo de ET_0 SEDIYAMA (1996) e, para a sua utilização são empregados dados de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), radiação sola (R_s) e velocidade do vento (V). Os produtores rurais, contudo, nem sempre dispõem desses dados, sendo necessária a utilização de métodos mais simples para o cálculo de ET_0 .

Conforme PEREIRA et al. (1997) em um projeto de irrigação, diversas variáveis são importantes quando se deseja o uso racional da água. Porém, a estimativa de consumo hídrico da cultura assume grande destaque, na medida em que se busca maximizar produção e minimizar custos. O consumo de água pela cultura é denominado de evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a ocorrência simultânea de dois processos importante no cultivo das plantas, a evaporação da água, do solo e das plantas

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 ET_0 . Uma maneira freqüentemente utilizada para verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) é por meio da comparação destes com o do Penman-Monteith, parametrizado pela FAO.

Nos métodos de estimativa a ET_0 é calculada por meio de uma equação matemática a partir dos valores obtidos para cada variável da equação. Existe, então, o problema de especificar o erro da ET_0 obtida com a combinação dos erros das variáveis, decorrentes dos instrumentos de medidas utilizados. (TURCO et al., 1994). Se for considerado o erro da estimativa da ET_0 , a avaliação da eficiência dos métodos para a estimativa da ET_0 se torna mais consistente e ajustada, otimizando a eficiência da irrigação e manejo da água. O trabalho teve por objetivo avaliar três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Hargreaves, Makkink e Radiação Solar) para o município de Pradópolis – SP, considerando os erros (ET_0)

II. REVISÃO DE LITERATURA

PEREIRA et al. (1995) estudou diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração e observou que o método de Penman-Monteith foi o que apresentou maior sensibilidade, por integrar, além do balanço de energia radiante e dos princípios aerodinâmicos, outros fatores de transferência do sistema solo-planta-atmosfera

DANTAS NETO (1999) Avaliou métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró, RN. Os valores diários da ET_0 foram comparados com ET_0 estimado pelo método Penman-Monteith. Os resultados evidenciaram um melhor ajuste pelo método de Penman seguido da Radiação Solar.

MACHADO & MATTOS (2000) Avaliaram três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Penman, Tanque Classe A, e tanque de 20 m²) com os dados obtidos em lisímetro de lençol freático constante.

Muitos Trabalhos quando compara métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, não se preocupam com erros da ET_0 devido a acurácia do equipamento utilizado. 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).

BORGES & MENDIONDO (2007) compararam equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. O estudo foi realizado com o objetivo de se verificar a precisão dos métodos de estimativa de ET_0 propostos por Camargo, Blaney-Criddle, Hamon, Hargreaves, Thornthwaite e Kharrufa.

Na comparação das equações com o método FAO Penman-Monteith, verificaram que a equação de Hargreaves com coeficientes regionais apresentou índices de confiança superiores a 0,995 para a bacia do Rio Jacupiranga e é recomendada devido à sua exequibilidade e simplicidade.

TURCO et al. (2008) avaliaram métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para região de Jaboticabal – SP, usando uma técnica que considera os erros da ET_0 , observaram que o método obteve um ajuste adequado com o do Penman-Monteith foi o de Hargreaves. Os métodos de Makkink, Tanque Classe A e Radiação Solar não obtiveram um ajuste adequado com o do Penman-Monteith. Segundo os autores, para avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração deve-se considerar os erros da estimativa da ET_0 , evitando possíveis erros de avaliação.

GUIRRA et al. (2010) avaliaram dois métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (Hargreaves 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 ET_0 , para Cristalina-GO. Observaram que método de Hargreaves obteve um ajuste adequado com o do Penman-Monteith.

Observa-se que há necessidade para cada localidade ou região realizar um estudo no qual se tem objetivo de verificar métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência.

III. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na região de Ribeirão Preto situado na Cidade de Pradópolis - SP, no período de setembro de 2009 a setembro de 2010. O referido posto está localizado na latitude 16° 46' S, longitude 47° 36' W e altitude de 1000 metros e faz parte da rede de Estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

As determinações diárias da evapotranspiração de referência (ET_o), por meio de uma estação meteorológica automatizada, foram feitas nas condições climáticas de Pradópolis - SP, utilizando-se os métodos de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), Hargreaves (1976), Radiação Solar (Doorenbos & Pruitt, 1977) e Makkink (1957).

Para a obtenção dos dados meteorológicos, foi instalada na área experimental uma estação meteorológica automatizada, marca Vaisala com os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa, marca Vaisala; velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co; radiação solar global, modelo CM6B Kipp & Zonen. A estação possui um sistema de aquisição de dados conectado a sensores por meio de cabos.

Para realização 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 ET_o: Makkink (1957), Hargreaves (1976), 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,

$$EToM = (0,61 Q W) - 0,12 \quad (1)$$

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

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

Q = radiação solar global medida ou estimada, cal cm⁻² 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:

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

na qual,

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:

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

na qual,

Ka = constante calculada por meio de diferentes valores de W e T .

Substituindo a eq. (3) na (2) tem-se:

$$EToM = (\frac{Ka}{59} 0,61 Q T) - 0,12 \quad (4)$$

e considerando que:

$$Kb = \frac{Ka 0,61}{59}$$

tem-se:

$$ETo M = Kb Q T - 0,12 \quad (5)$$

Método de Hargreaves

Seja,

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

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, $^{\circ}\text{F}$;

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

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, $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

$1/59$ = 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 da Radiação Solar

Seja,

$$ET_o = C W Q \quad (9)$$

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, $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

Pode-se escrever a eq. (9) na seguinte forma:

$$ET_o = \frac{C W Q}{59} \quad (10)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, mm dia^{-1} ;

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:

$$C = K_a U V \quad (11)$$

$$W = K_b T \quad (12)$$

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, $^{\circ}\text{C}$.

Substituindo as eq. (11) e (12) na (10), tem-se:

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

Considerando que:

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

tem-se:

$$ETo = K_c U V T Q \quad (13)$$

Método do Penman-Monteith

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

$$ETo(PM) = \frac{0,409 \Delta (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) V (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 V)} \quad (14)$$

na qual,

$ETo_{(PM)}$ = evapotranspiração de referência pelo método de PM, em gramado, mm d^{-1} ;

Rn = radiação líquida, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$;

G = fluxo de calor no solo, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$;

T = temperatura média do ar, $^{\circ}C$;

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, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$;

γ = coeficiente psicrométrico, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$;

900 = fator de conversão.

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

$$e = (U/100) e_s \quad (15)$$

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:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \quad (16)$$

A curva de pressão de vapor é determinada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (17)$$

Substituindo as equações (15), (16) e (17) na (14), temos:

$$ETo = \frac{\frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) Rn}{(T + 237,3)^2} + 36,666324 \frac{V \left(\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) - \frac{1}{100} U \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \right)}{T + 273}}{\frac{2503,0584 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} + 0,0667 + 0,022678 V} \quad (18)$$

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

Transferência do erro da variável independente para a variável dependente

Quando relacionamos diariamente a EToPM com a ETo (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:

$$x \longrightarrow \sigma_x \qquad y \longrightarrow \sigma_{y0}$$

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:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_0^2 \sigma_x^2, \quad (19)$$

em que $(dy/dx)_0$ é uma estimativa preliminar da derivada (dy/dx) . A variância σ_y^2 é a variância original σ_{y0}^2 somada a uma variância $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0^2 \sigma_x^2$ que representa a incerteza transferida de x para y .

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 $\{x_1, y_1, \sigma_1\}$, $\{x_2, y_2, \sigma_2\}$, ..., $\{x_i, y_i, \sigma_i\}$, ..., $\{x_n, y_n, \sigma_n\}$, 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:

$$y = ax + b. \quad (20)$$

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

$$f(x, a_1, a_2) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x), \quad (21)$$

na qual

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x, & f_2(x) &= 1, \\ a_1 &= a & \text{e} & a_2 = b. \end{aligned} \quad (22)$$

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:

$$A = M^{-1} B \quad (23)$$

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

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

A matriz M pode ser escrita com notação mais simples:

$$M = \begin{bmatrix} S_{x^2} & S_x \\ S_x & S_\sigma \end{bmatrix}, \quad (25)$$

em que

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

$$S_y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2}, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}. \quad (26)$$

A matriz M^{-1} é dada por

$$M^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} S_\sigma & -S_x \\ -S_x & S_{x^2} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

em que

$$\Delta = (S_\sigma S_{x^2} - S_x^2). \quad (28)$$

Assim, os melhores valores para a e b dados por (23) são:

$$a = \frac{1}{\Delta} (S_\sigma S_{xy} - S_x S_y) \text{ e} \quad (29)$$

$$b = \frac{1}{\Delta} (S_x^2 S_y - S_x S_{xy}). \quad (30)$$

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 adequada 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 , σ_i), a quantidade X^2 (estatístico) é definido como

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2}. \quad (31)$$

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

$$X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu}, \quad (32)$$

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 neste trabalho, $\nu = 243$. Foram feitos os seguintes procedimentos para determinar o χ_{red}^2 (1% e 99%).

Programa microsoft excel / função estatística / inv.qui para $\nu = 243$ e 1%
é obtido $X^2 = 297,21$; portanto $X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu} = 1,223$.

Programa microsoft excel / função estatística / inv.qui para $\nu = 243$ e 99%
é obtido $X^2 = 197,67$; portanto $X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu} = 0,724$.

Pode-se afirmar com 98% de confiança que: $0,724 < \chi_{red}^2 < 1,223$

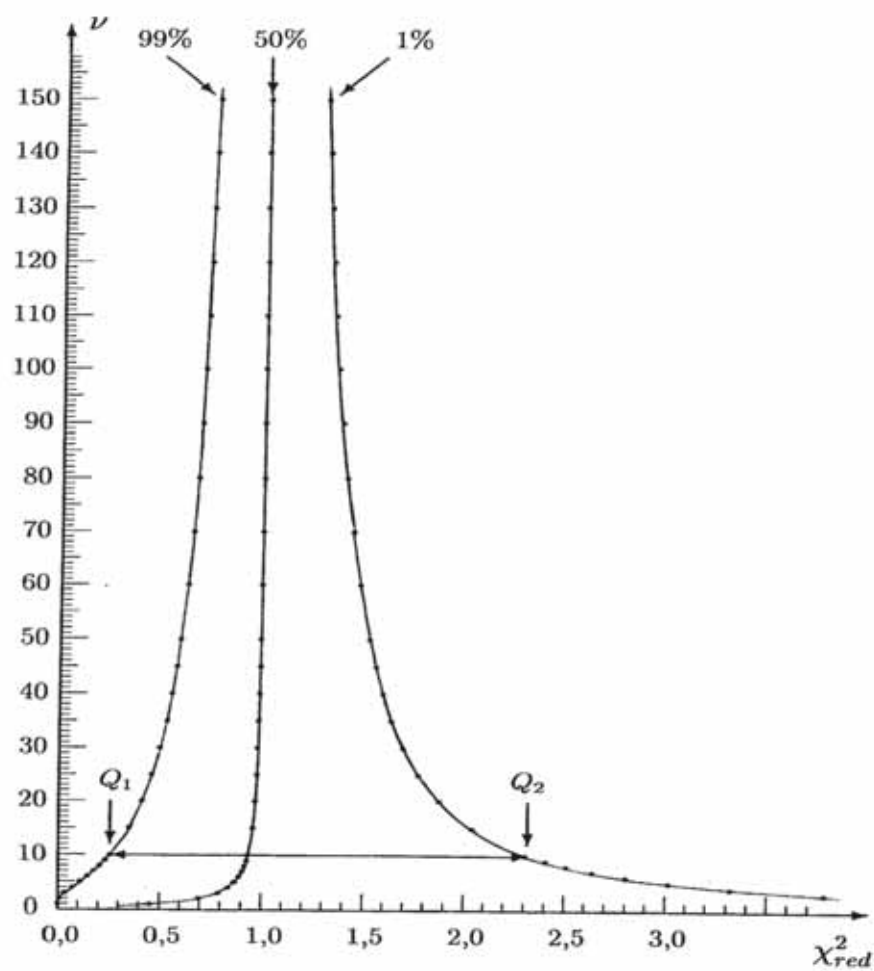


Figura 1. Gráfico que relaciona ν com χ^2_{red} (Vuolo, 1996).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O erro diário associado à estimativa da EToP 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 , no período de setembro de 2009 a setembro de 2010. Da mesma forma, foram obtidos os erros diários ($\pm\Delta E_{ToM}$, $\pm\Delta E_{ToH}$, $\pm\Delta E_{ToR}$) associados às estimativas da EToM, EToH, e EToR, utilizando-se a técnica citada.

A Figura 2, mostra os valores médios mensais da ETo $\pm\Delta E_{To}$ 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 EToP erros $\pm\Delta E_{ToP}$. As acurácias dos instrumentos de medidas da radiação global (Q) e temperatura do ar (T) causaram na EToM erros $\pm\Delta E_{ToM}$. Verifica-se na Figura 2 que os instrumentos de medidas utilizados para obtenção da EToP causaram erros maiores ($\pm\Delta E_{ToP}$) do que os utilizados para obtenção da EToM com erros $\pm\Delta E_{ToM}$, para todos os meses avaliados. Com esses dados, não dá para se ter noção em até que ponto esses erros associados às grandezas ETo 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 ($\pm\Delta E_{To}$) e o teste do qui-quadrado reduzido para avaliação da qualidade do ajuste.

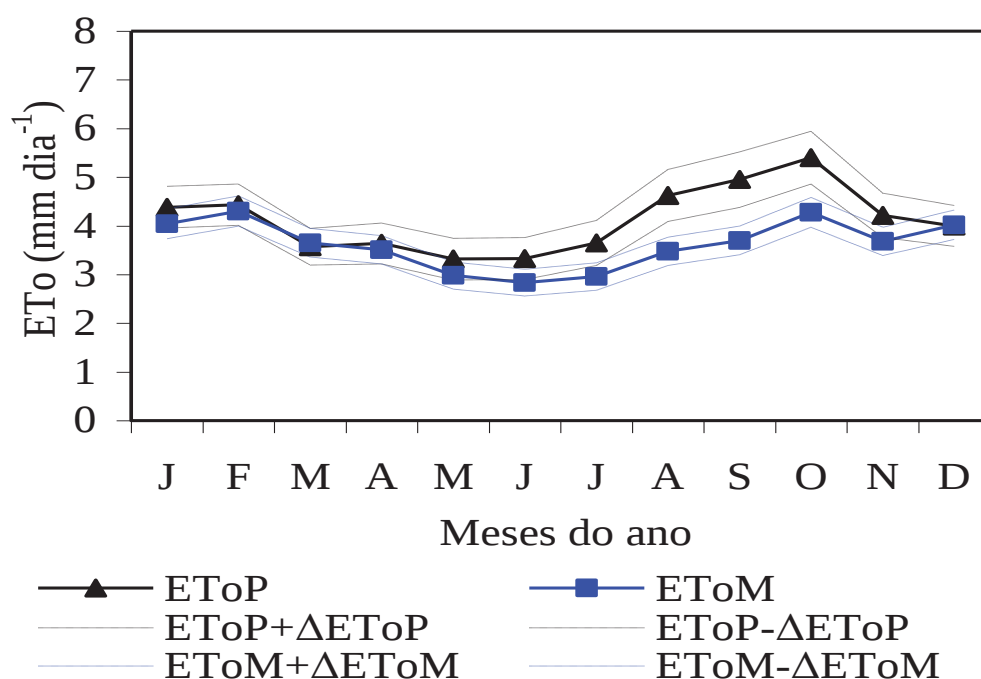


Figura 2. Valores médios mensais da $ET_0 \pm \Delta ET_0$, para os métodos Penman-Monteith e Makkink.

Na Figura 3, temos os valores médios mensais de $ET_0 \pm \Delta ET_0$ 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_0 .

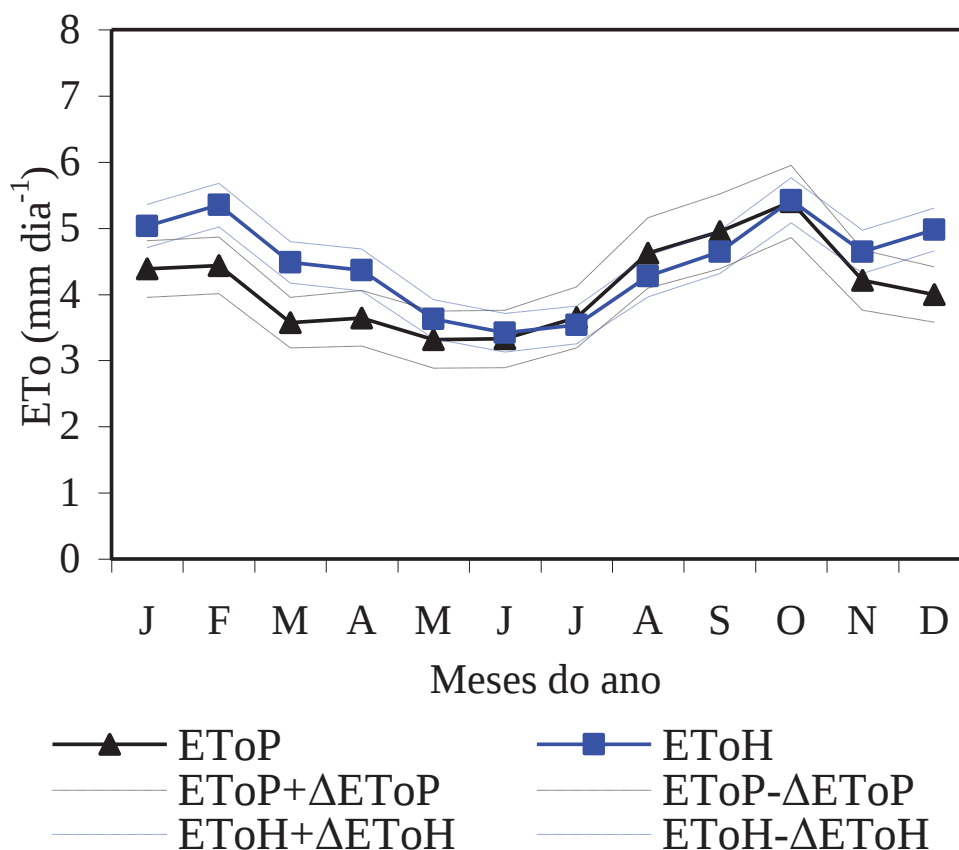


Figura 3. Valores médios mensais da $ETo \pm \Delta ETo$, para os métodos Penman-Monteith e Hargreaves.

Na figura 4, são apresentados os valores médios mensais de $ETo \pm \Delta ETo$ 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 $EToR$ erros ($\pm \Delta EToR$). Os instrumentos de medidas utilizados causaram erros maiores ($\pm \Delta EToR$) do que os utilizados para obtenção de $EToM$, $EToH$ e $EToT$; além disso, causaram erros maiores do que para obtenção da $EToP$.

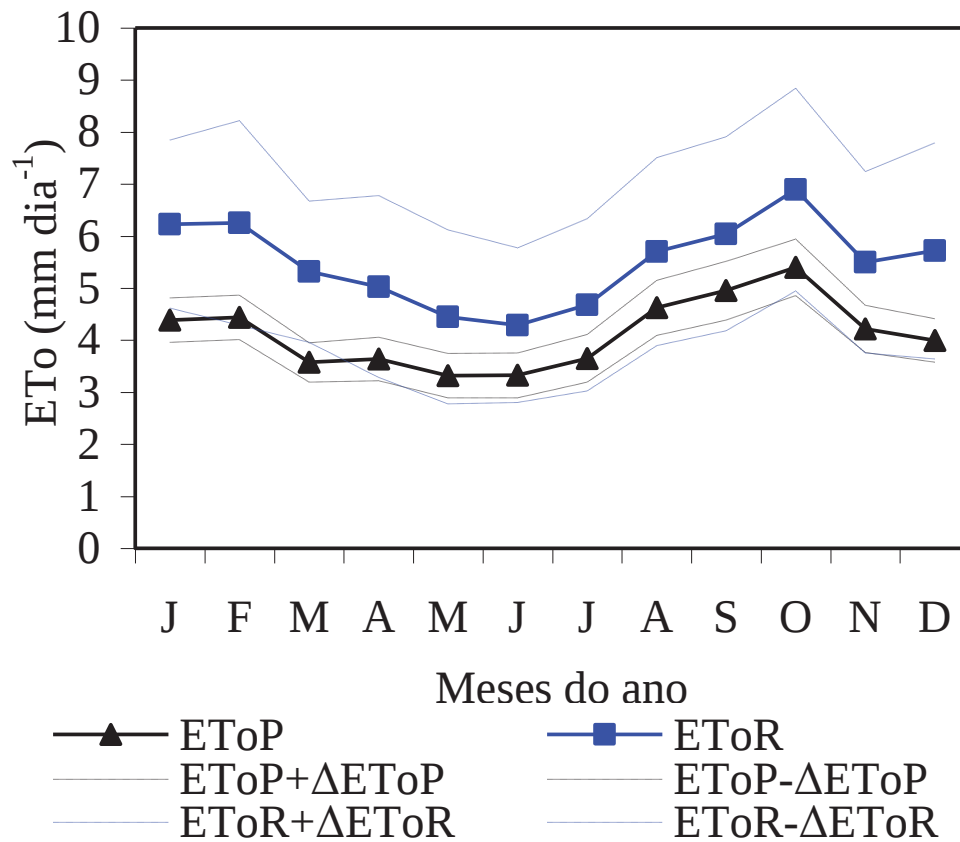


Figura 4. Valores médios mensais da $ET_{\pm\Delta ET}$, para os métodos Penman-Monteith e Radiação Solar.

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.

$$ET_{ToP} = 1,001 ET_{ToM} + 0,541 \quad (33)$$

$$ET_{ToP} = 0,726 ET_{ToH} + 0,769 \quad (34)$$

$$ET_{ToP} = 0,739 ET_{ToR} + 0,104 \quad (35)$$

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

As Figuras 5, 6, 7, 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 5, $\nu = 243$ e $\chi^2_{red} = 0,041$. Este valor de χ^2_{red} não está na faixa de valores aceitáveis para o qui-quadrado reduzido (Figura 1). Assim, é provável que a reta não seja uma função adequada para ser ajustada aos pontos experimentais. Portanto, há evidências, que os métodos de Penman-Monteith e Radiação Solar não podem ser comparados.

A Figura 6 mostra a reta ajustada. No caso, $\nu = 243$ e $\chi^2_{red} = 0,800$, de forma que o ajuste é plenamente satisfatório do ponto de vista de qualidade de ajuste. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Hargreaves não são distintos, portanto, podem ser comparados.

No ajuste da reta da Figura 8, $\nu = 243$ e $\chi^2_{red} = 0,420$. Esse valor de χ^2_{red} também está fora da faixa de valores aceitáveis para χ^2_{red} (Figura 1), indicando que a reta não é uma função adequada para ser ajustada aos pontos experimentais. Estatisticamente, há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e Makkink são distintos, portanto, não podendo ser comparados. O resultado deste trabalho, para o município de Cristalina - GO, de que o método de Hargreaves tem um ajuste plenamente satisfatório com o de Penman-Monteith, corroboram com o de TURCO et al. (2008), para o município de Jaboticabal – SP.

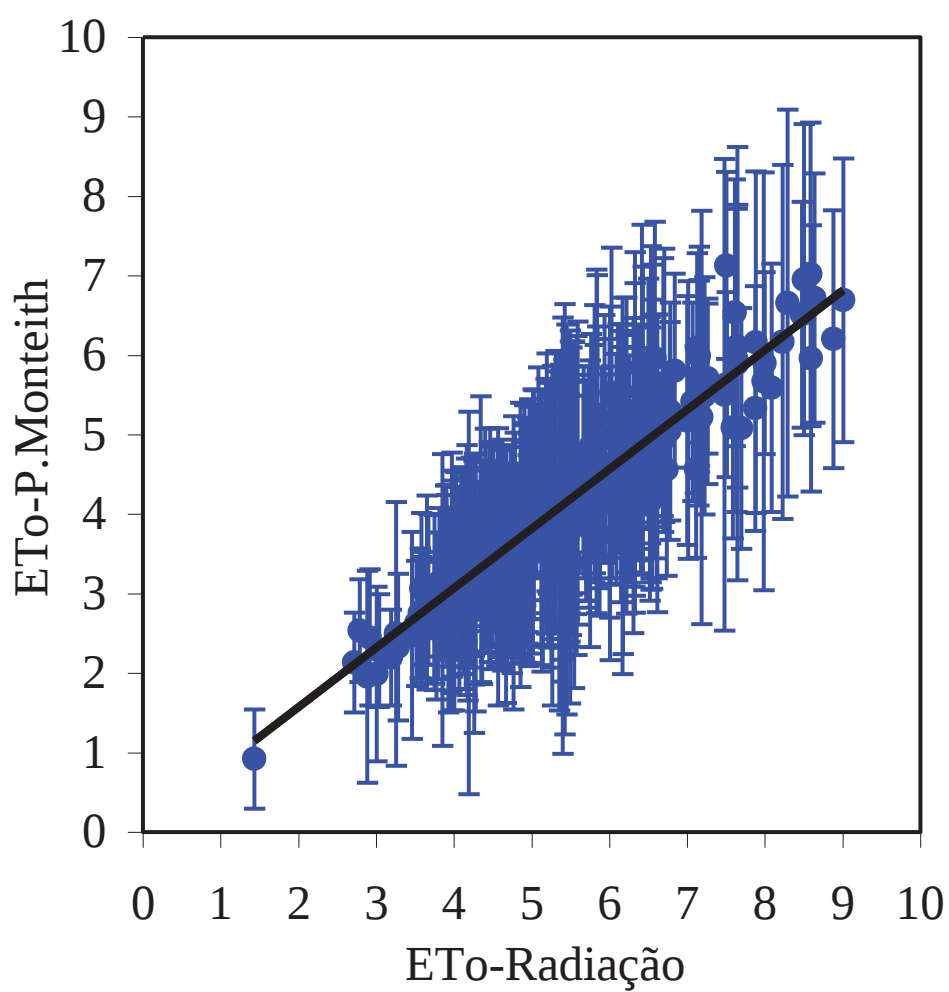


Figura 5. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método da Radiação Solar, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

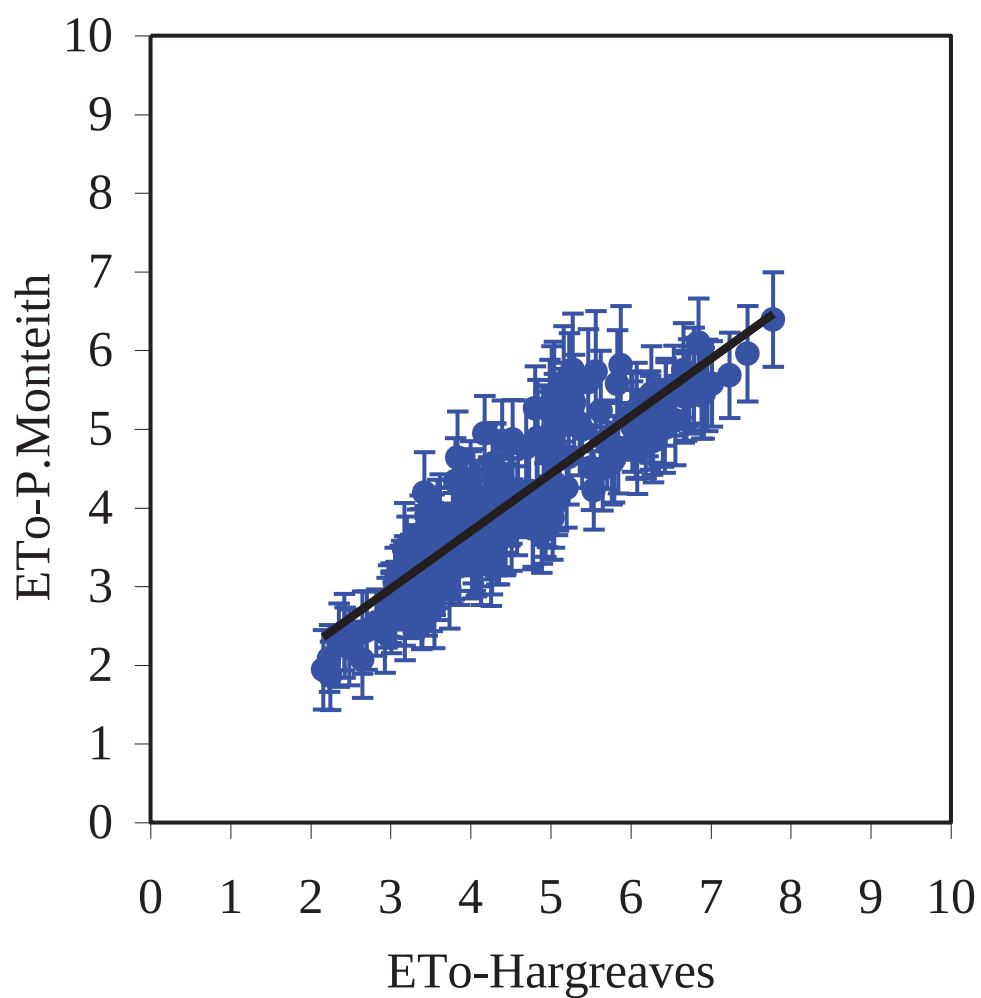


Figura 6. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

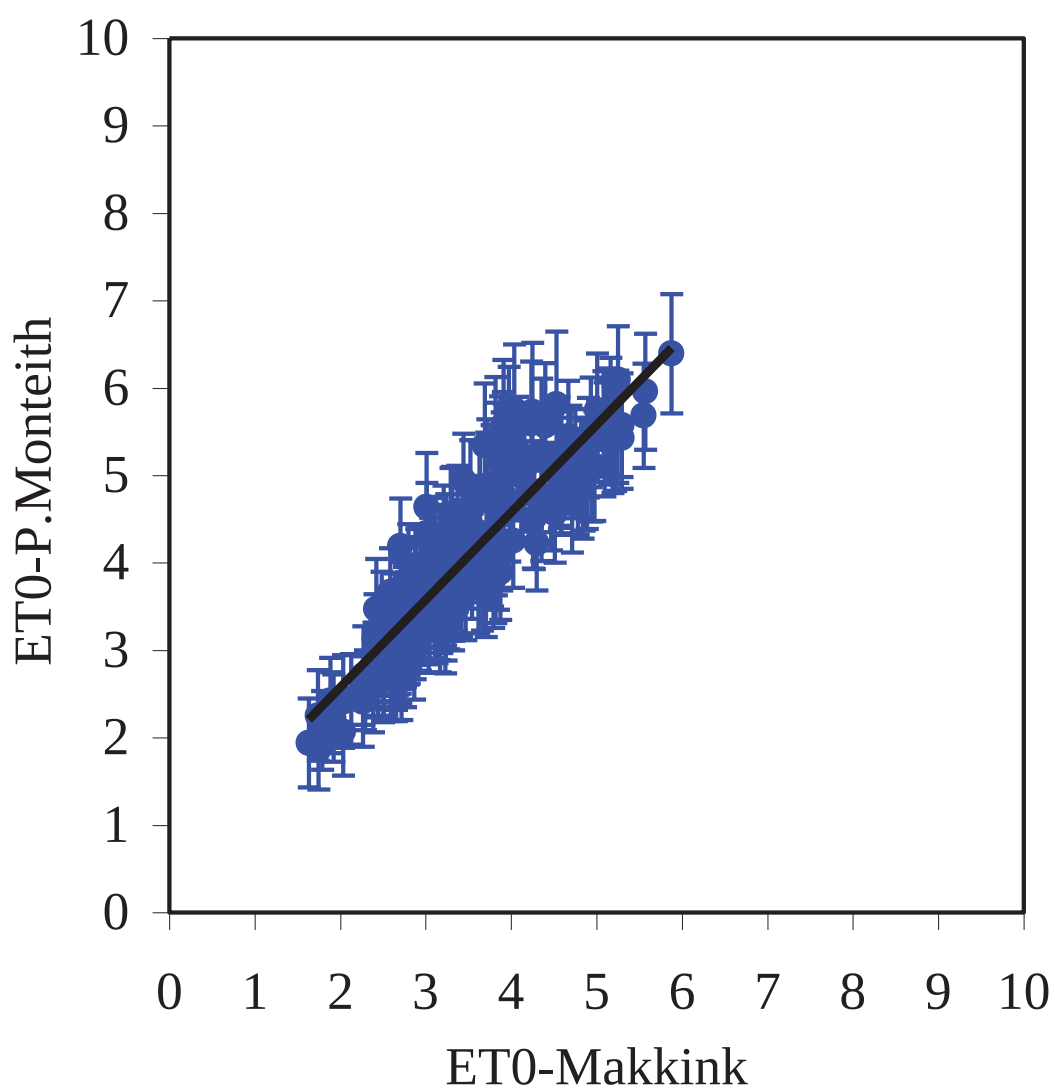


Figura 7. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Makkink, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

V. CONCLUSÃO

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 ajuste plenamente satisfatório para estimativa da ETo, considerando o método de Penman-Monteith como padrão, para o método de Hargreaves. Os outros dois métodos estudados não tiveram um ajuste satisfatório com o método de Penman-Monteith.

VI. 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**, p.56,1998.

BORGES, A.C; MENDIONDO, E.M.. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

BURMAN, R.D., NIXON, P.R, WRIGHT, J.L., PRUITT, W.O. **Water requirements**. In: **JENSEN, M.E., ed. Design and operation of farm irrigation systems**. St Joseph, ASAE,. p.189-232, 1983.

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**, p. 24, 1977.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: **FAO**, p 93,1979.

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.

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, 44p, 1976.

MAKKINK, G.H. Ekzameno 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.; FERNANDES, E.J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. **Engenharia Agrícola. Jaboticabal**, v.23, n.3, p.468-477, 2003.

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.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: **FAO**, p 56,1998.

BORGES, A.C; MENDIONDO, E.M.. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: **FAO**, 1977. 179p.

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.

TURCO, J.E.P.; PERECIN, D.; PINTO JR, D.L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Irriga: **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**. Botucatu-SP, v.13, n.1, p.63-80. 2008.

GUIRRA, A. P. P. M.; PEIXOTO W.A.; TURCO, J.E.P.; FARIA, M.T.; ZANINI, J.R. **Avaliação de dois métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para região de cristalina – GO, usando uma técnica que considera os erros da ET_o**, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA ,2010.

Moreira, H.J.C. Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas. Manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 90p, 1993

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**, v.25, p.713-721, 2005.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4,n.1, p.i-xii, 1996

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba:**FEALQ**, 1997. 183p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.; PEREIRA, A.S.; BARBIERI, V. **A model for the class A pan coefficient. Agricultural Water Management**, v.76, p.75-82, 1995. [

Machado, R.E.; Mattos, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.2, p.193-197, 2000.