

INFLUÊNCIA DA FORMA DE OBTENÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO NA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

José Eduardo Pitelli Turco; Manoel Teixeira de Faria; Edemo João Fernandes

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

1 RESUMO

Uma maneira freqüentemente utilizada para verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em diferentes situações e locais é por meio de comparação com um método padrão. Porém, a utilização de diferentes métodos para a obtenção do saldo de radiação, empregado na estimativa da evapotranspiração, pode conduzir a resultados distintos. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do método de obtenção do saldo de radiação na comparação de quatro métodos (FAO-Tanque Classe A, FAO-Radiação Solar, Makkink e Hargreaves-Samani) com o método padrão recomendado pela FAO (Penman-Monteith). A pesquisa foi desenvolvida em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP, onde foi instalada uma estação meteorológica automatizada e um Tanque Classe A. Por intermédio de um sistema de aquisição de dados foram obtidas medidas da radiação solar global, saldo de radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os resultados indicam que as formas de obtenção do saldo de radiação podem alterar a estimativa da evapotranspiração diária obtida pelo método de Penman-Monteith.

UNITERMOS: estação meteorológica automatizada, radiação solar, Penman-Monteith

TURCO, J. E. P.; FARIA, M. T. de; FERNANDES E. J. INFLUENCE OF NET RADIATION OBTENTION METHOD COMPARED TO THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE METHODS

2 ABSTRACT

One way to verify the efficiency of evapotranspiration reference (ET_o) estimate methods in different conditions is through the comparison to a standard method. However the utilization of several methods to obtain the net radiation using evapotranspiration reference estimate, can end up in different results. The purpose of this paper was to evaluate the influence of the net radiation obtention method compared to four methods (FAO – Class A pan, FAO – Radiation, Makkink and Hargreaves-Samani) to the Penman-Montheith method which is considered a standard method by FAO. The research was carried out at an experimental area of the Rural Engineering Department of FCAV/São Paulo State University, Jaboticabal, SP, Brazil. Global net radiation, air temperature, air relative humidity, and wind speed were obtained using an automated weather station equipped with sensors. The results showed that the net radiation obtaintion methods can alter the daily evapotranspiration estimate obtained by the Penman-Montheith method.

KEYWORDS: automated weather station, solar radiation, Penman-Monteith

3 INTRODUÇÃO

Evapotranspiração pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para atmosfera, incluindo evaporação da água do solo diretamente e o processo de transpiração

através dos tecidos vegetais. Devido à necessidade de conhecer a perda d'água de superfícies vegetadas vários pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa da evapotranspiração.

Informações sobre a evapotranspiração de referência são fundamentais tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação.

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 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 frequentemente 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.

Geralmente, nos trabalhos que avaliam métodos de estimativa da ETo são usados dados meteorológicos obtidos em estações climatológicas tradicionais. Nessas estações o saldo de radiação não é fornecido, sendo estimado de várias formas.

Atualmente, devido aos avanços tecnológicos alcançados pelo homem, há uma tendência de utilização de estações meteorológicas automatizadas na área agrícola, permitindo medir os dados meteorológicos. Nessas estações podem ser utilizados sensores de vários tipos, para se obter o saldo de radiação.

De acordo com Hargreaves e Fellow (1994) a padronização das condições do local para coleta de dados climáticos e confiabilidade dos mesmos são tão importantes quanto à escolha da equação usada para estimativa da ETo.

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

Abteu e Obeysekera (1995) estudaram a evapotranspiração de taboa (*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. Chiew et al. (1995) compararam a ETo estimada usando os métodos de Penman-Monteith, métodos da FAO-24 e Tanque Classe A com dados de dezesseis localidades da Austrália. Observaram que o método de Penman FAO-24 é, geralmente, 20 a 40% maior que o de Penman-Monteith. A estimativa diária da ETo pelo método da radiação FAO-24 e Penman-Monteith foi similar. Os métodos do Tanque Classe A e Penman-Monteith obtiveram uma satisfatória correlação.

Dantas Neto (1999), para avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, utilizou dados da estação climatológica principal pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada em Mossoró-RN. Verificou que os valores diários da ETo estimado com os métodos FAO-Blaney-Criddle, FAO-Radiação, FAO-Penman, apresentaram bons coeficientes de determinação (96%), enquanto que o método de Hargreaves-Samani apresentou um coeficiente de determinação apenas mediano (83%), quando comparados com a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith. Observou também que o valor médio da ETo obtido pelo método FAO-Tanque foi próximo ao da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, apesar de que os resultados obtidos evidenciaram que o mesmo não teve melhor ajuste, apresentando uma subestimativa para valores de baixa demanda de ETo e passando a superestimá-la quando a taxa da ETo tende a aumentar.

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 meteorológica automatizada instalada em uma área cultivada com soja verificou que as evapotranspirações real, 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 (2004), 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 forma de obtenção do saldo de radiação na avaliação de métodos de estimativa da ETo.

A fim de contribuir com estudos desta natureza foi desenvolvido esse trabalho, o qual teve como objetivo estudar a influência da forma de obtenção do saldo de radiação na comparação de métodos de estimativa da ETo. Para esse estudo foram comparados dois métodos sugeridos pela FAO 24, isto é, FAO-Tanque Classe A e FAO-Radiação Solar, e ainda os métodos de Makkink e Hargreaves-Samani com o método de Penman-Monteith (FAO-56).

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. Na 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 4 de fevereiro de 2002. A partir de 1 de março os dados começaram a ser registrados no sistema de aquisição de dados.

A medida da radiação solar global foi realizada com um piranômetro da marca Eppley, modelo 8-48.

O saldo de radiação foi medido com dois saldo radiômetros, sendo um da marca Rebs (modelo: Q-7.1, Net Radiometer) e outro da marca Kipp & Zonen (modelo NRLITE). Também foi estimado o saldo de radiação pelas equações desenvolvidas por André e Volpe (1988), descritas a seguir:

$$\text{Primavera-Verão} \rightarrow Q^* = 16 + 0,78Q; \quad (1)$$

$$\text{Outono-Inverno} \rightarrow Q^* = -92 + 0,94Q; \quad (2)$$

nas quais,

$$Q^* = \text{saldo de radiação, cal. cm}^{-2}. \text{ d}^{-1};$$

$$Q = \text{radiação solar global, cal. cm}^{-2}. \text{ d}^{-1}.$$

A temperatura e umidade relativa do ar foram obtidas com um psicrômetro de termopares desenvolvido por Turco e Fernandes (2001). Os sensores de radiação solar global, saldo de radiação, temperatura do ar e umidade relativa do ar foram fixados a 1,5 m acima da superfície gramada.

A velocidade do vento foi obtida por meio de um anemômetro (R.M. Young Co) modelo 03001, instalado a 2 m da superfície gramada.

Para a obtenção da evaporação da água do tanque, em mm por dia, foi instalado na área experimental um Tanque Classe A, conforme especificações do Serviço Meteorológico Norte Americano (U.S.W.B).

As estimativas diárias da evapotranspiração de referência (ETo) foram feitas para outono, inverno, primavera e verão, no período de vinte de março de 2002 a dezenove de março de 2003, nas condições climáticas de Jaboticabal-SP, utilizando-se os seguintes métodos: FAO-Tanque Classe A e

FAO-Radiação Solar (DOORENBOS & PRUITT, 1977), Makkink (1957), Hargreaves-Samani (1985) e Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). As estimativas diárias da ETo pelo método do Penman-Monteith foram obtidas pelas seguintes maneiras de obtenção do saldo de radiação: sensor marca Rebs (PMr), sensor marca Kipp & Zonen (PMkz) e por meio da equação de André e Volpe (1988) com dados do Posto Meteorológico da FCAV/UNESP - Campus de Jaboticabal (PMpm).

Descrição dos métodos que foram utilizados para o cálculo da ETo:

FAO-PENMAN-MONTEITH (PM)

$$ETo = \frac{0,409 \Delta (Q^* - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 v)} \quad (3)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

Q^* = saldo radiação, MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

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

$(e_s - e)$ = déficit de pressão de vapor, kPa;

Δ = tangente à curva de pressão de vapor de saturação, kPa °C⁻¹;

γ = coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹, e

900 = fator de conversão.

O coeficiente psicrométrico foi calculado por meio das equações de Smith (1990).

MAKKINK (M)

$$ETo = 0,61 W Q - 0,12 \quad (4)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

W = fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo molhado;

Q = radiação solar global total medida, expressa em equivalente de evaporação (mm d⁻¹).

O fator de ponderação (W) foi calculado segundo as fórmulas proposta por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadham et al.(1991), citados por Pereira et al. (1997).

$$W = 0,407 + 0,0145Tu, \text{ quando } 0 < Tu < 16^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$W = 0,483 + 0,01Tu, \text{ quando } 16,1 < Tu < 32^\circ\text{C} \quad (6)$$

FAO-RADIAÇÃO SOLAR (RS)

$$ETo = c W Q \quad (7)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

W = fator que representa a parte fracional de radiação solar que é utilizada na evapotranspiração ;

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

c = coeficiente angular de regressão ETo x W Q, determinado em função da umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento a 2m de altura.

O fator de ponderação (W) foi calculado de modo semelhante ao método do Makkink.

HARGREAVES-SAMANI (HS)

$$ETo = 0,0023 Q_o (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} (T + 17,8) \quad (8)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

$T_{máx}$ = temperatura máxima, °C;

$T_{mín}$ = temperatura mínima, °C;

T = temperatura média diária, °C;

Q_o = radiação extraterrestre em equivalente de evaporação, tabelado de acordo com a latitude e mês do ano, mm d⁻¹.

FAO-TANQUE CLASSE A (TCA)

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

na qual,

ET_o = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

ECA = evaporação medida no Tanque Classe "A", mm d⁻¹;

Kp = coeficiente do tanque.

A análise dos resultados foi feita para o período diário, utilizando-se análise de regressão considerando o modelo linear, em que a variável dependente foi o método de Penman-Monteith (PM), empregando-se as várias formas de obtenção do saldo de radiação, e as estimativas da ET_o pelos demais métodos foi a variável independente.

Foram analisados os erros padrão de estimativas (SEE) entre as estimativas da ET_o (método) e ET_o (PM), de acordo com a equação:

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-1)} \right]^{0.5} \quad (10)$$

na qual,

Y_i = estimativa da ET_o (PM);

\hat{Y}_i = ET_o corrigida (equação da reta);

n = número total de observações.

Utilizou-se também o índice de concordância (d) proposto por Willmot et al. (1985) citado por Camargo e Sentelhas (1997) e Medeiros (1998). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para uma concordância perfeita. Dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum \left(\left| \hat{Y}_i - \bar{Y}_i \right| + \left| Y_i - \bar{Y}_i \right| \right)^2} \right] \quad (11)$$

na qual,

\hat{Y}_i = valor estimado;

Y_i = valor observado;

\bar{Y}_i = média dos valores observados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 apresenta os valores do saldo de radiação diário pelos diferentes métodos de obtenção, para as quatro estações do ano. Houve variação no saldo de radiação em função da maneira de obtenção, bem como para as estações do ano. Verifica-se que houve grande diferença do saldo de radiação obtido pelas equações desenvolvidas com dados do Posto Meteorológico da FCAV/UNESP - Câmpus de Jaboticabal, e os obtidos pelos sensores da marca Rebs e Kipp & Zonen. O motivo dessa diferença, provavelmente, foi que as equações foram desenvolvidas com dados obtidos de sensores (radiação global e saldo de radiação) diferentes do utilizado nesse trabalho.

Os dados de saldo de radiação obtidos por Fritschen (1967) corroboram com os obtidos neste trabalho por meio do saldo radiômetro da marca Kipp & Zonen. Portanto, o método mais apropriado para se obter o saldo de radiação é pelo sensor da marca Kipp & Zonen.

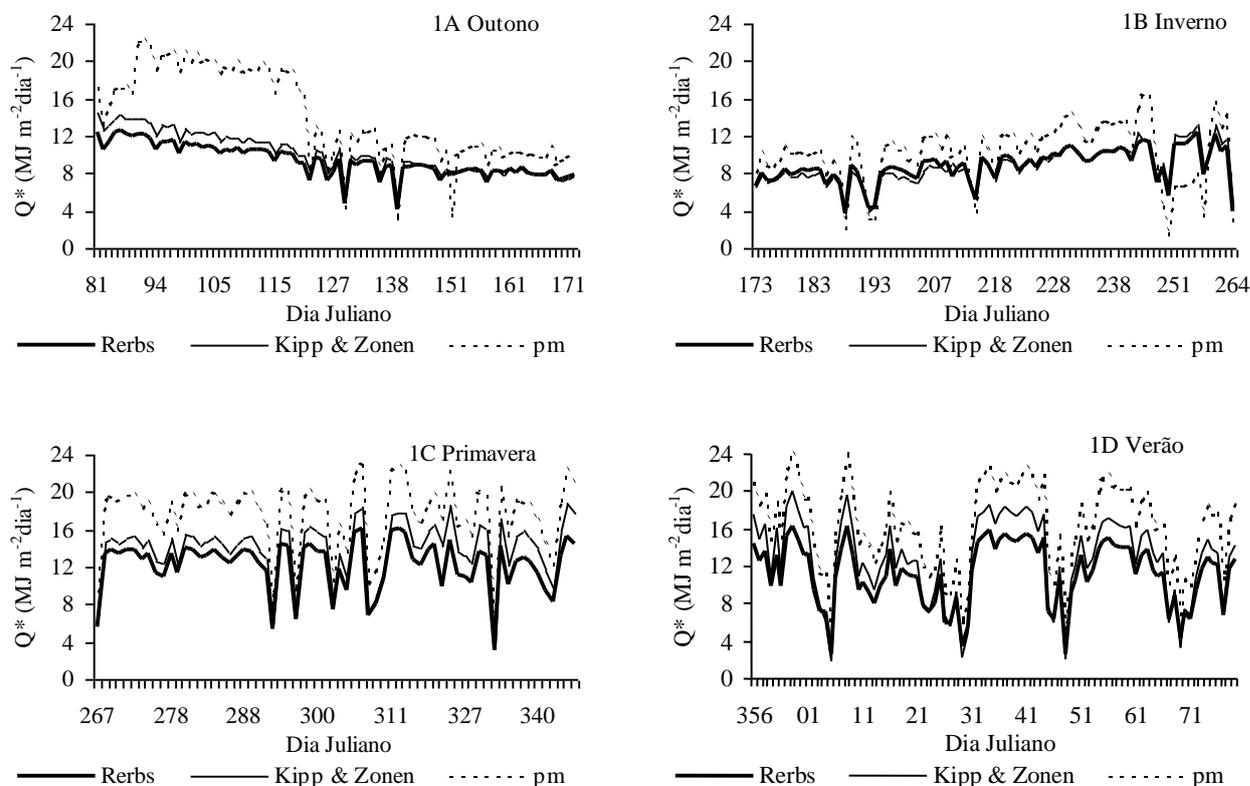


Figura 1. Comportamento do saldo de radiação (Q^*) pelas diferentes formas de obtenção nas estações do ano (1A outono, 1B inverno, 1C primavera e 1D verão).

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios diários da ETo, estimados para o período estudado, pelos métodos de Penman-Monteith (PMr, PMkz e PMpm), Radiação Solar (RS), Hargreaves-Samani (HS), Makink (M) e Tanque Classe A (TCA).

Verifica-se que a utilização de diferentes métodos para a obtenção do saldo de radiação conduziu, em alguns, casos a resultados diferentes, quando foi comparada a ETo obtida pelos métodos estudados em relação à obtida pelos métodos de Penman-Monteith. Por exemplo, a ETo obtida pelo método da Radiação Solar superestimou em 29 e 19% a ETo determinada pelos métodos de PMr e PMkz, respectivamente, e subestimou em 2% a ETo obtida pelo método de PMpm. Assim, os resultados apresentados por Dantas Neto (1999), quando comparou vários métodos com o do Penman-Monteith, só são válidos para a maneira que foi obtido o saldo de radiação.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados da regressão dos valores diários da ETo estimados pelos métodos de Penman-Monteith (PMr, PMkz e PMpm) com os métodos da Radiação Solar, Hargreaves-Samani, Makink e Tanque Classe A, para as quatro estações do ano. Verifica-se que as linhas de regressão obtidas pelos métodos estudados em relação aos métodos de Penman-Monteith apresentaram resultados diferentes em alguns casos quando comparadas com a linha de valores iguais (1:1).

Tabela 1 - Valores médio da ETo estimados para o período de Março de 2002 a Março de 2003.

Obtenção do Q*	Método	ETo médio (mm d ⁻¹)	% relativa
Rebs (PMr)	Penman-Monteitn	3,33	100
	Radiação Solar	4,29	129
	Hargreaves-Samani	4,65	140
	Makkink	2,91	87
	Tanque Classe A	4,76	143
Kipp & Zonen (PMkz)	Penman-Monteitn	3,60	100
	Radiação Solar	4,29	119
	Hargreaves-Samani	4,65	129
	Makkink	2,91	81
	Tanque Classe A	4,76	132
Equação (PMpm)	Penman-Monteitn	4,39	100
	Radiação Solar	4,29	98
	Hargreaves-Samani	4,65	106
	Makkink	2,91	66
	Tanque Classe A	4,76	109

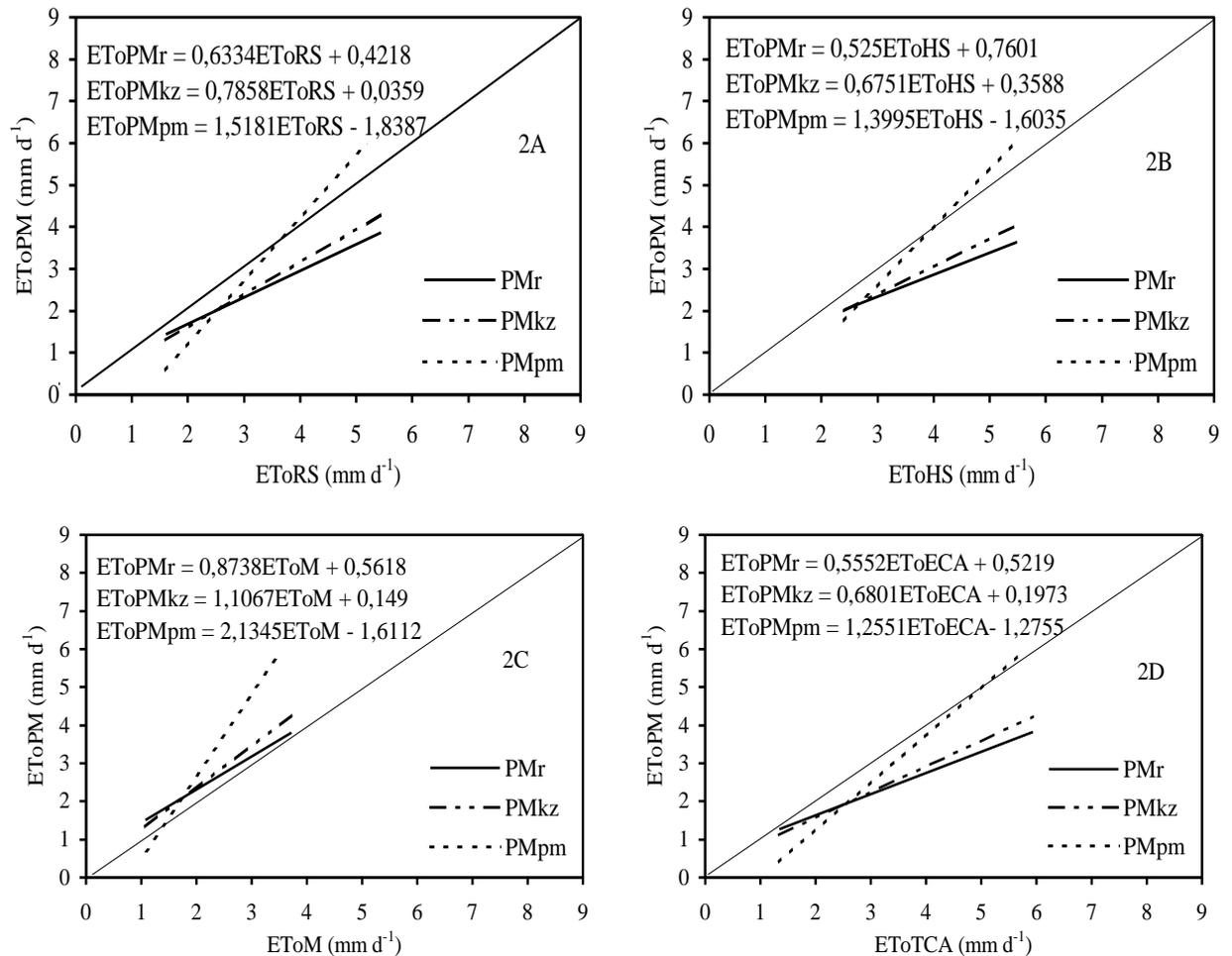


Figura 2. Linhas de tendência da correlação entre os valores diários da ETo obtidos com os métodos da Radiação solar, Hargreaves-Samani, Makkink e Tanque Classe A, em relação aos métodos de Penman-Monteith (outono).

Na Figura 2A, nota-se que a linha de tendência do método da Radiação Solar em relação ao de PMr apresentou uma maior superestimativa à medida que cresce a demanda evapotranspirativa. Resultado semelhante foi obtido quando comparada com a estimada pelo método de PMkz. Já em relação à obtida pelo método de PMpm, houve uma superestimativa para demanda evapotranspirativa inferior a $3,4 \text{ mm d}^{-1}$, passando a subestimar para valores maiores. Verifica-se, nas Figuras 2B e 2D, que a análise de regressão dos métodos de Hargreaves-Samani e Tanque Classe A, em relação aos métodos de Penman-Monteith, apresentam resultados semelhantes ao método da Radiação Solar (Figura 2A). Observa-se uma subestimativa da linha de tendência obtida pelo método de Makkink com os métodos de PMr e PMkz (Figura 2C). Em relação ao método de PMpm, a linha de tendência apresenta uma superestimativa para valores da ET_o até aproximadamente $1,4 \text{ mm d}^{-1}$, passando a subestimar à medida que aumenta a demanda evapotranspirativa.

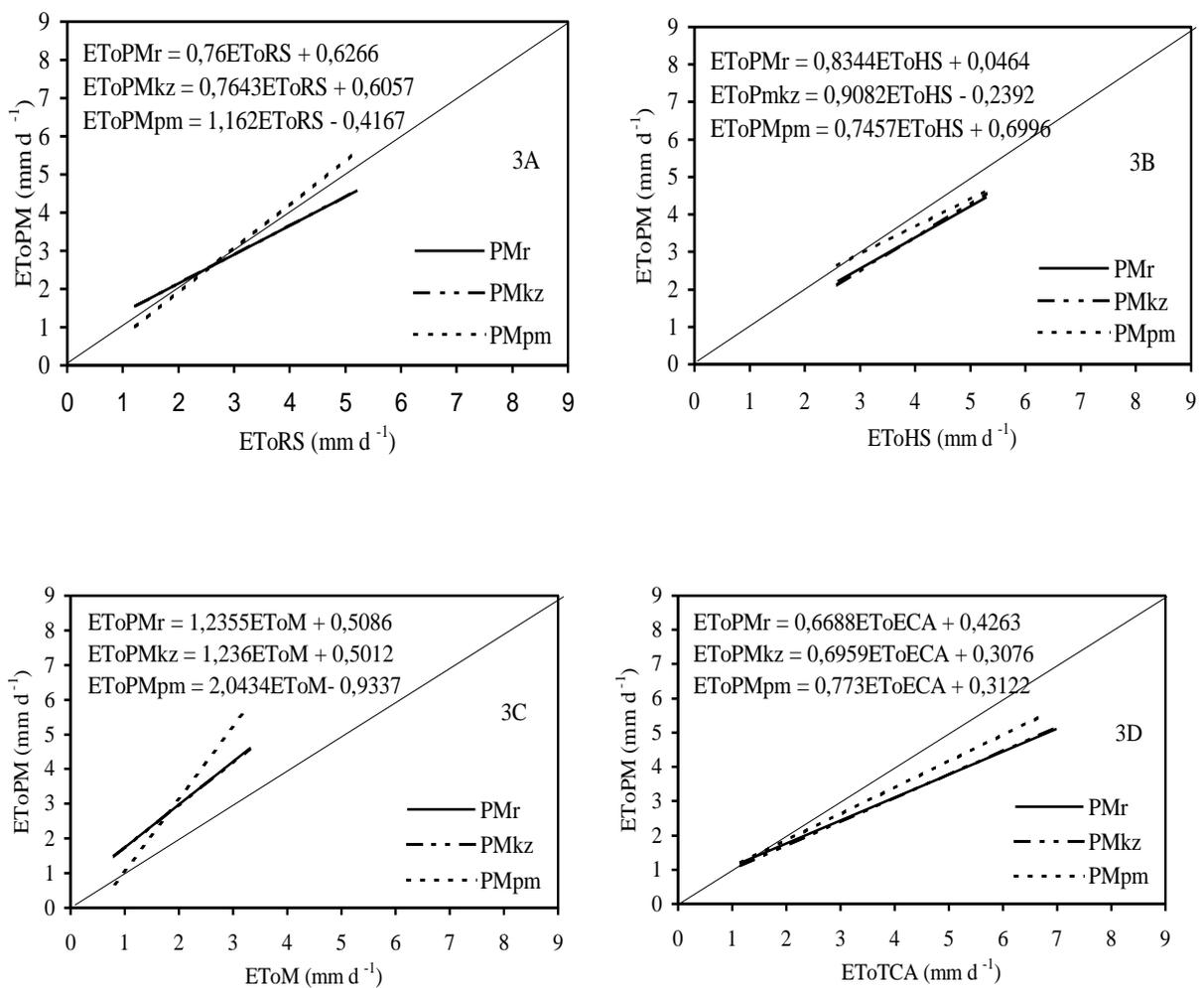


Figura 3. Linhas de tendência da correlação entre os valores diários da ET_o , obtidos com os métodos da Radiação solar, Hargreaves-Samani, Makkink e Tanque Classe A, em relação aos métodos de Penman-Monteith (inverno).

Nota-se na Figura 3A que, a linha de tendência do método da Radiação Solar em relação aos métodos de PMr e PMkz, apresenta uma subestimativa para valores de até aproximadamente $2,8 \text{ mm d}^{-1}$, passando a superestimar quando a demanda evapotranspirativa ultrapassa esse valor. Porém,

quando comparada com o método de PMpm, ocorre uma superestimativa para valores de até aproximadamente $2,9 \text{ mm d}^{-1}$, passando a subestimar a partir desse valor. Na Figura 3B, verifica-se uma superestimativa da linha de tendência do método de Hargreaves-Samani em relação aos métodos de PMr e PMkz, no entanto, em relação a PMpm, há um bom ajuste para valores de $2,6 \text{ mm d}^{-1}$, passando a superestimar para maiores valores. Já na análise de regressão entre o método do Tanque Classe A e os métodos de Penman-Monteith, a linha de tendência ajusta-se à linha 1:1 para valores próximos de $1,2 \text{ mm d}^{-1}$, ocorrendo uma superestimativa a partir desse valor (Figura 3D). O que se observa na Figura 3C é uma subestimativa da linha de tendência determinada pelo método de Makkink em relação aos métodos de PMr e PMkz, mas, em relação a PMpm apresenta um bom ajuste para valores próximos a 1 mm d^{-1} , passando a subestimar quando a demanda evapotranspirativa aumenta

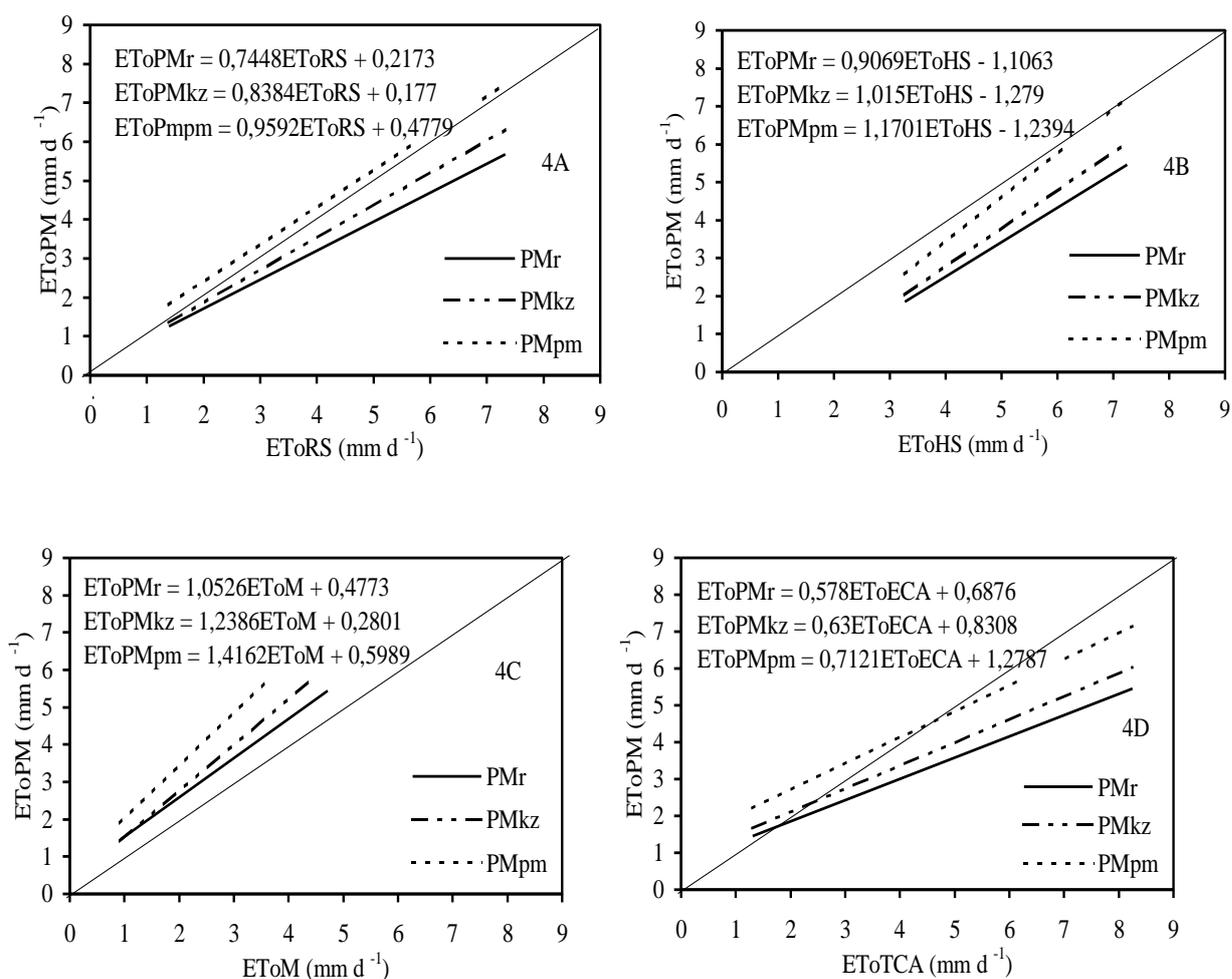


Figura 4. Linhas de tendência da correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos com os métodos da Radiação solar, Hargreaves-Samani, Makkink e Tanque Classe A, em relação aos métodos de Penman-Monteith (primavera).

Analisando as Figuras 4A, observa-se que a análise de regressão do método da radiação solar com os métodos de PMr e PMkz apresenta uma superestimativa, sendo mais acentuada em relação a PMr. Para o método de PMpm, verifica-se uma subestimativa com tendência de aproximar da linha 1:1 com aumento da demanda evapotranspirativa. Observando a Figura 4B, nota-se que a linha de tendência obtida pelo método de Hargreaves-Samani com os métodos de Penman-Monteith evidencia

uma superestimativa, sendo que, em relação a PMpm, a linha de tendência aproxima da reta 1:1 com valores da demanda evapotranspirativa acima de $6,8 \text{ mm d}^{-1}$. Na Figura 4C, nota-se que a linha de tendência da correlação entre o método de Makkink e os de Penman-Monteith mostra uma subestimativa, sendo mais definida em relação a PMpm. A análise de regressão entre os métodos do Tanque Classe A e os métodos de PMr e PMkz (Figura 4D) mostra uma subestimativa para uma demanda evapotranspirativa até $1,5$ e $2,2 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, passando a superestimar para demandas evapotranspirativas maiores, enquanto, em relação ao método de PMpm, houve uma subestimativa para valores de ETo até 4 mm d^{-1} , passando a superestimar para valores de ETo maiores.

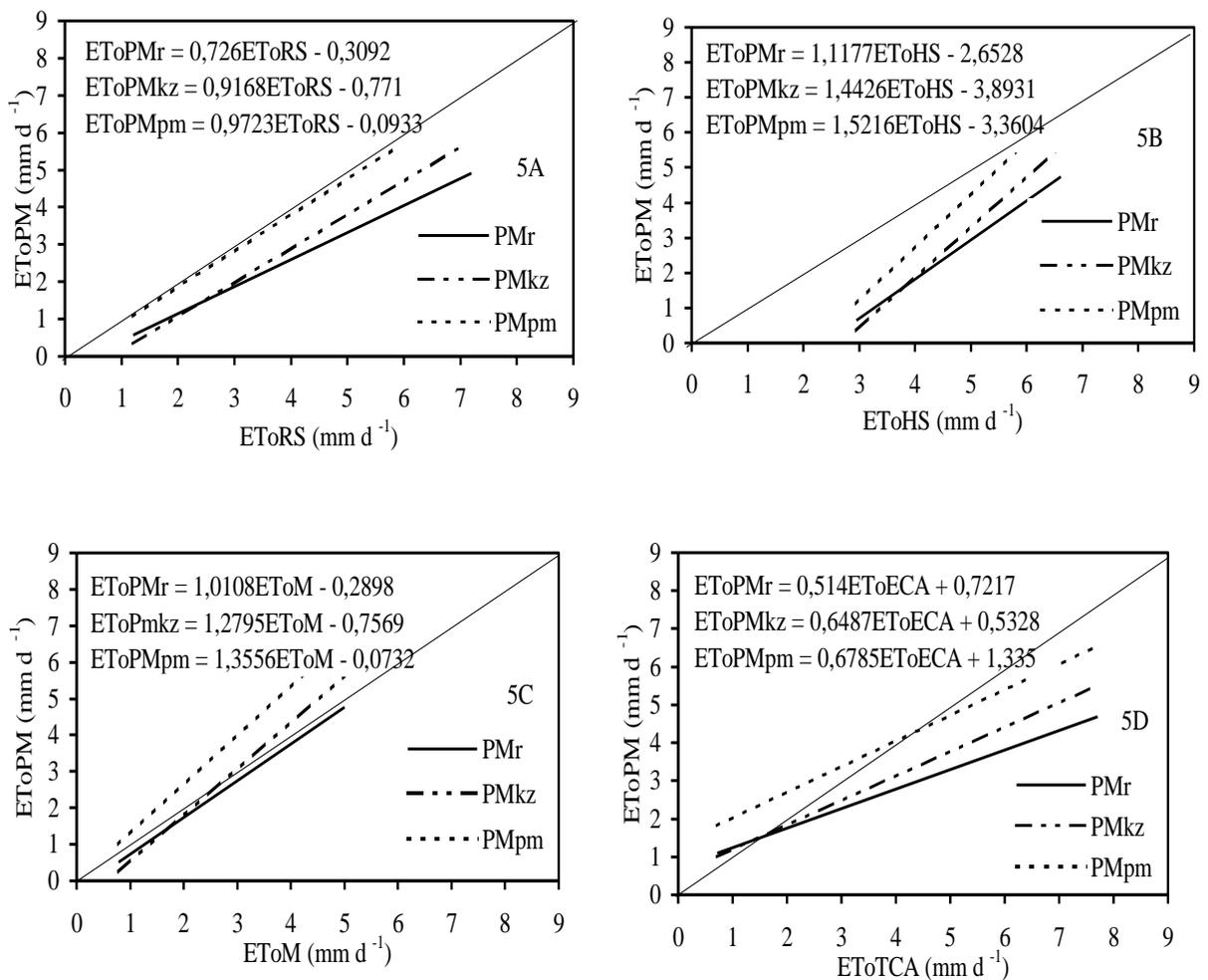


Figura 5. Linhas de tendência da correlação entre os valores diários da ETo, obtidos com os métodos da Radiação solar, Hargreaves-Samani, Makkink e Tanque Classe A, em relação aos métodos de Penman-Monteith (verão).

A Figura 5A mostra os resultados da regressão obtida pelo método da Radiação Solar com os métodos de Penman-Monteith. Pode-se verificar nessa figura que houve uma superestimativa, sendo que, em relação a PMpm, a linha de tendência se aproximou da reta 1:1. A análise de regressão entre o método de Hargreaves-Samani e os métodos de PMr e PMkz (Figura 5B) apresenta uma superestimativa, sendo menos acentuada em relação a PMkz, que vai se aproximando da reta 1:1 à medida que aumenta a demanda evapotranspirativa. A análise de regressão entre o método de Hargreaves-Samani e PMpm proporciona uma superestimativa para uma demanda evapotranspirativa menor que $6,5 \text{ mm d}^{-1}$, porém, com demanda acima desse valor, a linha de tendência chega a igualar-

se à reta 1:1. Na Figura 5C verifica-se que a análise de regressão obtida pelo método de Makkink em relação a PMr apresenta uma superestimativa para qualquer demanda evapotranspirativa. Em relação ao método de PMkz, houve, inicialmente, uma superestimativa, passando a subestimar para demanda evapotranspirativa superior a 3,2 mm d⁻¹. Já em relação ao método de PMpm, ocorreu uma subestimativa para todos os valores da ETo, sendo crescente com o aumento da demanda evapotranspirativa. Na Figura 5D, observa-se que a análise de regressão entre o método do Tanque Classe A e os métodos de PMr e PMkz mostra uma superestimativa com valores da ETo a partir de 1,8 mm d⁻¹. Em relação ao método de PMpm, houve, inicialmente, uma subestimativa, passando a superestimar a partir de 4,5 mm d⁻¹.

Em função dos resultados apresentados, referentes às Figuras 2, 3, 4 e 5, pode-se verificar que, em trabalhos que avaliam métodos de estimativa da ETo em função de um método padrão (Penman-Monteith) e utilizam-se, para essa avaliação, a linha de regressão em função da linha de valores iguais (1:1); a utilização de diferentes métodos para a obtenção do saldo de radiação pode conduzir a resultados diferentes. Em trabalhos que buscam determinar os modelos de regressão ($y = ax + b$) que correlacionam métodos de estimativa da ETo com um método padrão, pode ocorrer o problema citado.

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, são apresentados os resultados obtidos da análise de regressão, o índice de concordância (d) e erro padrão de estimativa (EES), para os valores diários da ETo determinados para as quatro estações do ano, pelos métodos avaliados e os de Penman-Monteith (PMr, PMkz, PMpm). Observa-se que, em alguns casos, os índices avaliados são diferentes em função da forma de obtenção do saldo de radiação utilizada nos métodos de Penman-Monteith, por exemplo, no outono (Tabela 2), os EES e r^2 da regressão entre o método do Tanque Classe A e os métodos de Penman-Monteith foram 0,30, 0,35, 0,87 e 0,73, 0,75, 0,62, respectivamente. Os coeficientes angulares e lineares apresentaram resultados distintos. Portanto, a forma de obtenção do saldo de radiação influencia na avaliação dos métodos dentro de uma mesma estação do ano.

Na Tabela 2, verifica-se um melhor ajuste para o método da Radiação Solar quando comparado com o método de PMr, aparecendo os métodos de Makkink, Tanque Classe A e Hargreaves-Samani, respectivamente, na seqüência. Já na comparação com o método de PMkz os métodos da Radiação Solar e de Makkink apresentam resultados bem próximos, enquanto os métodos de Hargreaves-Samani e Tanque Classe A vem em seguida com ajuste semelhante. Contudo, na comparação dos métodos avaliados com o de PMpm, o que apresenta melhor resultado, é o método da Radiação Solar, ficando o método de Hargreaves-Samani como segundo melhor ajuste e os métodos de Makkink e Tanque Classe A na seqüência com os piores ajustes.

Verificando a Tabela 3, pode-se notar que o método do Tanque classe A quando comparado com o método de PMr, é o que apresenta o melhor ajuste, enquanto que o método da Radiação Solar aparece em seguida, estando os métodos de Makkink e Hargreaves-Samani com ajustes piores. Com relação ao método de PMkz, o melhor ajuste é conseguido com o método do Tanque Classe A seguido dos métodos da Radiação Solar, Makkink e Hargreaves-Samani, respectivamente. Quando comparados com o método de PMpm, o que se ajusta melhor é o método da Radiação Solar, seguido dos métodos de Makkink, Tanque Classe A e Hargreaves-Samani, diferentemente da seqüência de ajustes das observadas em relação às comparações com PMr e PMkz.

Observando a Tabela 4, pode-se verificar que o método da Radiação Solar, quando comparado aos métodos de Penman-Monteith, é o que apresenta melhor ajuste, aparecendo em segundo o método de Makkink. Os métodos do Tanque Classe A e Hargreaves-Samani aparecem com os piores ajustes quando confrontados com PMr e PMkz, enquanto, em relação ao método de PMpm, o que apresenta pior ajuste é o método do Tanque Classe A.

Na Tabela 5, pode ser observado que o método de Makkink apresenta melhor ajuste quando comparado com os métodos de Penman-Monteith, ao passo que o método da Radiação Solar aparece com o segundo melhor ajuste. No entanto, comparando os métodos de Hargreaves-Samani e Tanque Classe A com os métodos de Penman-Monteith, há uma alternância de correlação: o método do Tanque Classe A tem melhor ajuste que o de Hargreaves-Samani quando comparado a PMr; quando comparado com PMkz e PMpm, o método de Hargreaves-Samani aparece com melhor ajuste.

Tabela 2. Resultado da análise de regressão linear para o outono de 2002, em Jaboticabal-SP.

Obtenção da RL	Método	d	EES	ETo(PM) = aETo + b (met.)		
				a	b	r ²
Rerbs (PMr)	Radiação Solar	0,97	0,20	0,6334	0,4218	0,87
	Hargreaves-Samani	0,90	0,32	0,5250	0,7601	0,69
	Makkink	0,94	0,26	0,8738	0,5618	0,79
	Tanque Classe A	0,92	0,30	0,5552	0,5219	0,73
Kipp & Zonen (PMkz)	Radiação Solar	0,98	0,20	0,7858	0,0359	0,92
	Hargreaves-Samani	0,94	0,32	0,6751	0,3588	0,78
	Makkink	0,96	0,25	1,1067	0,1490	0,87
	Tanque Classe A	0,93	0,35	0,6801	0,1973	0,75
Equação (PMpm)	Radiação Solar	0,95	0,58	1,5181	-1,8387	0,83
	Hargreaves-Samani	0,95	0,61	1,3995	-1,6035	0,82
	Makkink	0,94	0,66	2,1345	-1,6112	0,78
	Tanque Classe A	0,87	0,87	1,2551	-1,2755	0,62

(d) Índice de concordância; (EES) erro padrão de estimativa para ETo estimada; (a, b, r²) coeficiente angular, coeficiente linear e coeficiente de determinação.

Tabela 3. Resultado da análise de regressão linear para o Inverno de 2002, em Jaboticabal-SP.

Obtenção da RL	Método	d	EES	ETo(PM) = aETo + b (met.)		
				a	b	r ²
Rerbs (PMr)	Radiação Solar	0,90	0,50	0,7600	0,6266	0,68
	Hargreaves-Samani	0,76	0,66	0,8344	0,0464	0,43
	Makkink	0,80	0,66	1,2355	0,5086	0,54
	Tanque Classe A	0,95	0,36	0,6688	0,4263	0,83
Kipp & Zonen (PMkz)	Radiação Solar	0,88	0,54	0,7643	0,6057	0,64
	Hargreaves-Samani	0,79	0,68	0,9082	-0,2392	0,47
	Makkink	0,82	0,64	1,2360	0,5012	0,51
	Tanque Classe A	0,95	0,37	0,6959	0,3076	0,84
Equação (PMpm)	Radiação Solar	0,98	0,35	1,1620	-0,4167	0,91
	Hargreaves-Samani	0,57	1,03	0,7457	0,6996	0,20
	Makkink	0,96	0,44	2,0434	-1,9337	0,85
	Tanque Classe A	0,88	0,69	0,7730	0,3122	0,64

(d) Índice de concordância; (EES) erro padrão de estimativa para ETo estimada; (a, b, r²) coeficiente angular, coeficiente linear e coeficiente de determinação.

Tabela 4. Resultado da análise de regressão linear para a Primavera de 2002, em Jaboticabal-SP.

Obtenção da RL	Método	d	EES	ETo(PM) = aETo + b (met.)		
				a	b	r ²
Rerbs (PMr)	Radiação Solar	0,95	0,45	0,7448	0,2173	0,81
	Hargreaves-Samani	0,85	0,68	0,9069	-1,1063	0,57
	Makkink	0,88	0,61	1,0526	0,4773	0,65
	Tanque Classe A	0,87	0,64	0,5780	0,6876	0,62
Kipp & Zonen (PMkz)	Radiação Solar	0,93	0,34	0,8384	0,1770	0,91
	Hargreaves-Samani	0,87	0,67	1,0150	-1,2790	0,63
	Makkink	0,94	0,50	1,2386	0,2801	0,80
	Tanque Classe A	0,88	0,66	0,6300	0,8308	0,64
Equação (PMpm)	Radiação Solar	0,97	0,39	0,9592	0,4779	0,91
	Hargreaves-Samani	0,88	0,76	1,1701	-1,2394	0,63
	Makkink	0,94	0,57	1,4162	0,5989	0,79
	Tanque Classe A	0,87	0,77	0,7121	1,2787	0,63

(d) Índice de concordância; (EES) erro padrão de estimativa para ETo estimada; (a, b, r²) coeficiente angular, coeficiente linear e coeficiente de determinação.

Tabela 5. Resultado da análise de regressão linear para o Verão de 2002, em Jaboticabal-SP.

Obtenção da RL	Método	d	EES	ETo(PM) = aETo + b (met.)		
				a	b	r ²
Rerbs (PMr)	Radiação Solar	0,98	0,27	0,7260	-0,3092	0,93
	Hargreaves-Samani	0,90	0,55	1,1177	-2,6528	0,69
	Makkink	0,98	0,26	1,0108	-0,2898	0,93
	Tanque Classe A	0,91	0,54	0,5140	0,7217	0,70
Kipp & Zonen (PMkz)	Radiação Solar	0,97	0,28	0,9168	-0,7710	0,95
	Hargreaves-Samani	0,92	0,63	1,4426	-3,8931	0,73
	Makkink	0,99	0,26	1,2795	-0,7569	0,95
	Tanque Classe A	0,91	0,65	0,6487	0,5328	0,72
Equação (PMpm)	Radiação Solar	0,99	0,21	0,9723	-0,0933	0,97
	Hargreaves-Samani	0,92	0,65	1,5216	-3,3604	0,74
	Makkink	0,99	0,19	1,3556	-0,0732	0,98
	Tanque Classe A	0,91	0,68	0,6785	1,3350	0,72

(d) Índice de concordância; (EES) erro padrão de estimativa para ETo estimada; (a, b, r²) coeficiente angular, coeficiente linear e coeficiente de determinação.

6 CONCLUSÕES

As comparações de métodos de estimativa da ETo com a obtida pelo método de Penman-Monteith são afetadas pelas diferentes formas de obtenção do saldo de radiação. Isso pode ocorrer ao utilizar-se uma estação meteorológica automatizada, nas quais as formas de obtenção do saldo podem ser diferentes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRÉ, B. R. G.; VOLPE, C. A. Estimativa do saldo de radiação em Jaboticabal (SP). **Revista Geográfica**, São Paulo. v.7, p.1-8, 1988.
- 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.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97,1997.
- CHIEW, F. H. S. et al. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and Class-A Pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.9-21, 1995.
- DANTAS NETO, F. S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referencia 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**. 2nd. ed. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper , 24).
- FARIA, F. J. et al. 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) **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v.24, p. 187-196, dez 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.

FRITSCHEN, L. J. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. **Agricultural Meteorology**, Netherlands, v.4, p.55-62, 1967.

HARGREAVES, G. H.; FELLOW, A. S. C. E. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.120, n.6. p.1132-1133, 1994.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A., Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Paper of the Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting, Chicago, n.85-2517, 1985.

MAKKINK, G. F. Ekzamenno de la formulo de Penman. **Nethrlands Journal Agricultural Science**, v.5, p.290-305, 1957.

MEDEIROS, S. L. P. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria - RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.105 - 109, 1998.

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

SANTIAGO, A. V. et al. 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.

SMITH, M. et al. **Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1990. 59 p.

TURCO, J. E. P.; FERNADES, E. J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001, 1 CD-ROM.

VESCOVE, H. V. **Comparação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP**. 2004. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.