

DESEMPENHO DE MÉTODOS EMPÍRICOS BASEADOS NA TEMPERATURA DO AR PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM URUSSANGA, SC.

Álvaro José Back

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Epagri, Estação Experimental de Urussanga, Urussanga, SC, ajb@unesc.net.

1 RESUMO

Foram comparadas estimativas da evapotranspiração de referência obtidas através de nove métodos empíricos como método de Penman-Monteith, calculados com dados da estação meteorológica de Urussanga, SC, do período de 1981 a 2005. Os dados foram agrupados em intervalos decendiais e mensais. Foram ajustadas as equações de regressão linear tendo a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith com variável dependente e os demais métodos como variável independente. A avaliação dos métodos foi realizada com base nos índices de exatidão e desempenho e nos erros de estimativa. Observou-se que os métodos de Ivanov e de Hargreaves modificados subestimam os valores de ETo em todos os meses. O método de Hargreaves apresentou desempenho ótimo para intervalo mensal e decendial, e os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram desempenho muito bom no intervalo mensal.

UNITERMOS: temperatura, evapotranspiração, consumo de água, irrigação.

BACK, A. J. PERFORMANCE OF EMPIRICAL METHODS BASED ON AIR TEMPERATURE TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION OF REFERENCE IN URUSSANGA, SC.

2 ABSTRACT

Estimates of evapotranspiration of reference (ETo) using nine methods, such as the Penman-Monteith method, were compared using data of the weather station of Urussanga, SC from 1981 to 2005. Data were grouped in ten-day and monthly intervals. Equations of linear regression were adjusted and ETo was calculated by Penman-Monteith method as dependent variable and the other methods as independent variable. The evaluation of the methods was based on of the indexes of accuracy, performance, and errors of estimate. The methods of Ivanov and modified Hargreaves underestimated the values of ETo every month. The method of Hargreaves had a great performance in both studied intervals, and the methods of Thornthwaite and Camargo had a very good performance at monthly intervals.

KEY WORDS: temperature, evapotranspiration, water consumption, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é utilizada nos balanços hídricos agrícolas e na modelagem dos processos climatológicos e hidrológicos, com finalidade de obter estimativa da necessidade de irrigação, na previsão de safras, avaliação de disponibilidade de recursos hídricos e caracterização climática.

Devido à dificuldade de medir diretamente a evapotranspiração, foram desenvolvidos vários métodos de estimativa de ET_o baseados nos fatores meteorológicos. Os métodos chamados de métodos combinados, como o método de Penman e seus derivados, são complexos e exigem maior quantidade de dados meteorológicos. Por outro lado, existem métodos baseados somente nos dados de temperatura do ar, que são mais simples, de fácil aplicação, embora de menor precisão. Alguns métodos, como o método de Thornthwaite e Blaney-Criddle, foram desenvolvidos para estimativas mensais de ET_o e outros, tais como os métodos de Makkink, Turc e o método e Priestley-Taylor podem ser utilizados para intervalos de dez dias (Lima, 1991). Os métodos de Penman, Penman-FAO e Penman-Monteith podem ser utilizados para intervalos diários (Amatya et al., 1995). A utilização e recomendação de um método de estimativa de ET_o devem ser realizadas com base na sua precisão, praticidade e disponibilidade de dados meteorológicos; para isso é necessário avaliar e calibrar os diversos métodos às condições climáticas locais.

Vários trabalhos (Allen, 1986; Allen et al. 1989; Peres, 1994; Sedyama, 1996; Pereira 1998) mostram que o método de Penman-Monteith (PM) é mais confiável para as estimativas de ET_o, sendo considerado como método padrão. O método de Penman-Monteith requer dados de variáveis climáticas como a temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e umidade do ar, porém, em muitos locais, essas variáveis não estão todas disponíveis. Há postos meteorológicos em que as únicas informações climáticas medidas são a temperatura do ar e a precipitação. Para esses locais, é necessário ajustar e avaliar a eficiência de métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência baseados no dado de temperatura do ar. Também existem locais em que, embora atualmente existam informações para uso do método de Penman-Monteith, a série histórica de temperatura do ar é muito mais extensa que as demais e, neste caso, a determinação da evapotranspiração por um método baseado no dado de temperatura permite a realização de balanços hídricos seriados de longo período.

Entre os métodos empíricos baseados na temperatura do ar, o método de Thornthwaite apresentou desempenho bom para as condições úmidas do interior paulista quando comparado com dados obtidos em evapotranspirômetros (Camargo e Sentelhas, 1997). Segundo Conceição (2003), as modificações sugeridas por Camargo et al. (1999), substituindo a temperatura média diária pela temperatura efetiva, melhoraram a eficiência do método de Thornthwaite.

O método de Camargo foi desenvolvido com base no método de Thornthwaite tendo apresentado resultados satisfatórios quando comparados com valores medidos em evapotranspirômetros no interior de São Paulo (Camargo e Sentelhas, 1997) e Santa Maria (Medeiros, 1998).

O método de Hargreaves é considerado muito simples e requer dados de temperatura e radiação solar. Nos locais sem dados de radiação, Hargreaves (1974) propôs modificação utilizando a razão de insolação e a radiação no topo da atmosfera. Outra modificação utiliza a umidade relativa do ar ao invés da razão de insolação. Allen et al. (1998) afirma que, quando não há dados de radiação solar, umidade relativa e de velocidade do vento, tem-se como alternativa o cálculo da ET pela fórmula de Hargreaves. O método de Hargreaves-Samani,

desenvolvido na Califórnia, demonstrou desempenho muito bom em diferentes locais do Brasil (Medeiros, 1998; Conceição, 2003).

O método de Blaney-Criddle foi desenvolvido na região semi-árida dos Estados Unidos, considerando os dados de temperatura, e é indicado pela FAO (Doorembos e Pruitt, 1977) para obter estimativas de valores evapotranspiração mensal.

Estudos de comparação entre métodos de estimativa da ETo foram realizados em vários locais do Brasil. Araujo et al. (2007) apresentam estudos comparando os métodos de Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Penman-FAO, tanque classe A e o método de Makkink com o método de Penman-Monteith considerado como método padrão. Fietz et al. (2005) compararam estimativas de ET obtidas com os métodos de Priestley-Taylor, Tanque Classe A, Hargreaves-Samani, Makkink, Camargo, Penman-Monteith com os valores medidos em lisímetros. Também Henrique (2006) apresentou estudo de estimativa de ETo para Campina Grande (PB), utilizando-se a amplitude térmica diária.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de nove métodos de estimativa de evapotranspiração baseados em dados de temperatura do ar para dados agrupados em intervalos decendiais e mensais com relação ao método de Penman-Monteith, calculados com os dados meteorológicos de Urussanga-SC.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados os dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação registrados na estação meteorológica de Urussanga-SC (latitude 28°31'S, longitude 49°19'W), do período de 1981 a 2005. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é mesotérmico úmido com verão quente (Cfa).

Foram obtidas as médias decendiais e mensais de cada variável meteorológica e, posteriormente, foram calculados os valores de evapotranspiração de referência nos intervalos decendiais e mensais pelo método de Penman-Monteith de acordo Allen et al. (1998):

$$ETo = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad [1]$$

em que: ETo = evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

R_n = saldo de radiação a superfície (MJ m⁻² d⁻¹);

G = fluxo de calor sensível no solo (MJ m⁻² d⁻¹);

T = temperatura média do ar a 2 m de altura (°C);

U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s = pressão de saturação de vapor (kPa);

e_a = pressão atual e vapor (kPa);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação (kPa °C⁻¹);

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

Os cálculos foram realizados conforme descrito por Allen et al. (1998), sendo que a temperatura média diária foi estimada como a média entre a temperatura máxima e mínima no dia. A radiação solar que atinge a superfície foi estimada por:

$$R_s = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) R_a \quad [2]$$

em que: R_s = radiação solar que atinge a superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

n = insolação horária (h)

N = duração máxima do brilho solar (h)

R_a = Radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Na estimativa de evapotranspiração pelo diversos métodos, foram usadas as equações descritas em Sedyama (1988), Jensen et al. (1990) e Pereira et al. (1997) com as seguintes expressões:

Método de Blaney-Criddle:

$$E_{To} = 0,75 (0,24 + 0,0312T)(0,457T + 8,13) p \quad [3]$$

em que: E_{To} = evapotranspiração de referência (mm/dia);

p = percentagem de horas de brilho solar diário em relação ao total anual;

T = temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$)

Método de Hargreaves:

$$E_{To} = 0,0075 R_s (1,8T + 32) \quad [4]$$

em que: R_s = Radiação solar na superfície (mm/dia):

T = temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$)

Método de Hargreaves modificado

$$E_{To} = R_a(1,8T + 32)0,0006\sqrt{100 - UR} \quad [5]$$

em que: R_a = radiação solar extraterrestre (mm/dia)

UR = umidade relativa do ar (%)

T = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$)

Método de Hargreaves-Samani (1985)

$$E_{To} = 0,0023 R_a \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} (T + 17,8) \quad [6]$$

em que: E_{To} = Evapotranspiração de referência (mm/dia);

R_a = radiação solar incidente no topo da atmosfera (mm/dia)

T_{\max} = temperatura máxima média ($^{\circ}\text{C}$)

T_{\min} = a temperatura mínima média ($^{\circ}\text{C}$)

T = Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$);

Método de Ivanov

$$E_{To} = 0,0018 (25+T)^2 (100 - UR) \quad [7]$$

em que: E_{To} = evapotranspiração (mm)

T = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$)

UR = umidade relativa média (%)

Método de Thornthwaite:

$$ETo = 16 \frac{N}{12} \frac{Nd}{30} \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad [8]$$

em que: ETo = evapotranspiração de referência(mm)

T = temperatura média do ar (°C)

N = duração média mensal do foto período do mês (h);

Nd = número de dias do mês (dias);

I, a = índices de calor obtidos a partir de dados normais da região, calculados por:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad [9]$$

onde T_i a temperatura média mensal mês i.

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad [10]$$

Método Thornthwaite modificado:

Utiliza-se a temperatura efetiva (T_{EF}) no lugar da temperatura média do ar, sendo a temperatura efetiva estimada por:

$$T_{EF} = 0,72(T_M + Amp) T \quad [11]$$

em que Amp = amplitude de variação térmica (°C)

$$Amp = T_{MAX} - T_{MIN} \quad [12]$$

T_{MAX} = Temperatura média máxima mensal (°C)

T_{MIN} = Temperatura média mínima mensal (°C)

Método de Thornthwaite modificada por Pereira (2004):

Pereira (2004) sugere a correção na variável T_{EF} em função da razão entre o número de horas dia/noite, conforme a equação:

$$T_{EF}^* = T_{EF} \left(\frac{N}{24 - N} \right) \quad [13]$$

sendo T_{EF}* = temperatura efetiva, corrigida para o foto período, °C;

N = foto período médio mensal, em horas.dia⁻¹

Método de Camargo:

$$ETo = Ra \ t \ K \ Nd \quad [14]$$

ETo = evapotranspiração de referência no período considerado (mm)

onde: Ra = radiação solar na superfície externa da atmosfera (mm);

t = temperatura média obtida pela média entre a temperatura máxima e mínima (°C)

K = fator de ajuste utilizando para ajuste entre as unidades adotadas que varia coma temperatura média local, sendo:

$K = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, para $t < 23^\circ\text{C}$

$K = 0,0105 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para $t = 24^\circ\text{C}$

$K = 0,011 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para $t = 25^\circ\text{C}$

$K = 0,0115 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para $t = 26^\circ\text{C}$

$K = 0,012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para $t > 26^\circ\text{C}$

N_d = número de dias do período.

Para a avaliação dos métodos de estimativa de E_{To} , foi realizada a análise de regressão linear considerando a estimativa de E_{To} pelo método de PM como variável dependente, e a estimativa de E_{To} pelos demais métodos como variável independente, isto é:

$$PM = a X + b \quad [15]$$

A precisão das estimativas foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), e do índice de exatidão (d) de Willmott et al. (1985) que expressa a exatidão das estimativas em relação aos valores observados, variando de zero que indica nulidade e 1 que indica perfeita concordância perfeita (exatidão). Segundo Willmott et al. (1985), o índice de exatidão é determinado da seguinte forma:

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)} \quad [16]$$

em que: O_i = valor estimado de E_{To} pelo método PM;

P_i = valor de E_{To} estimado pelos demais métodos

O = média dos valores estimados de E_{To} pelo método PM

i = o número de eventos .

A avaliação de desempenho de cada método foi realizada com o índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) e utilizado por Medeiros (2002) (Tabela 1), denominado de “ c ”, sendo o desempenho do método classificado conforme Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 1). O índice de desempenho reúne o índice de precisão “ r ” e de exatidão “ d ” sendo expresso da seguinte forma:

$$c = r.d \quad [17]$$

Tabela 1. Avaliação do desempenho dos métodos de evapotranspiração de referência, pelo índice “ c ”, segundo Camargo e Sentelhas (1997).

valor de “ c ”	Desempenho
$> 0,85$	ótimo
$0,76 - 0,85$	muito bom
$0,66 - 0,75$	bom
$0,61 - 0,65$	mediano
$0,51 - 0,60$	sofrível
$0,41 - 0,50$	mau
$\leq 0,40$	péssimo

Para quantificação de erros proporcionados pelas estimativas tem-se:

$$\text{Erro médio absoluto: } EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad [18]$$

$$\text{Erro máximo: } Em = \max(|O_i - P_i|) \quad [19]$$

$$\text{Erro aleatório: } Ea = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P^*)^2 \quad [20]$$

$$\text{Erro sistemático: } Es = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P^* - O_i)^2 \quad [21]$$

$$\text{Erro padrão de estimativa: } Epe = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n - 2}} \quad [22]$$

$$\text{em que } P^* = a + b O_i \quad [23]$$

em que: a e b são estimados pelo método dos mínimos quadrados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, estão representados os valores de ETo estimados pelos diversos métodos estudados neste trabalho. Na Tabela 2, estão os valores da média e desvio padrão da evapotranspiração anual e os valores relativos ao método de Penman-Monteith.

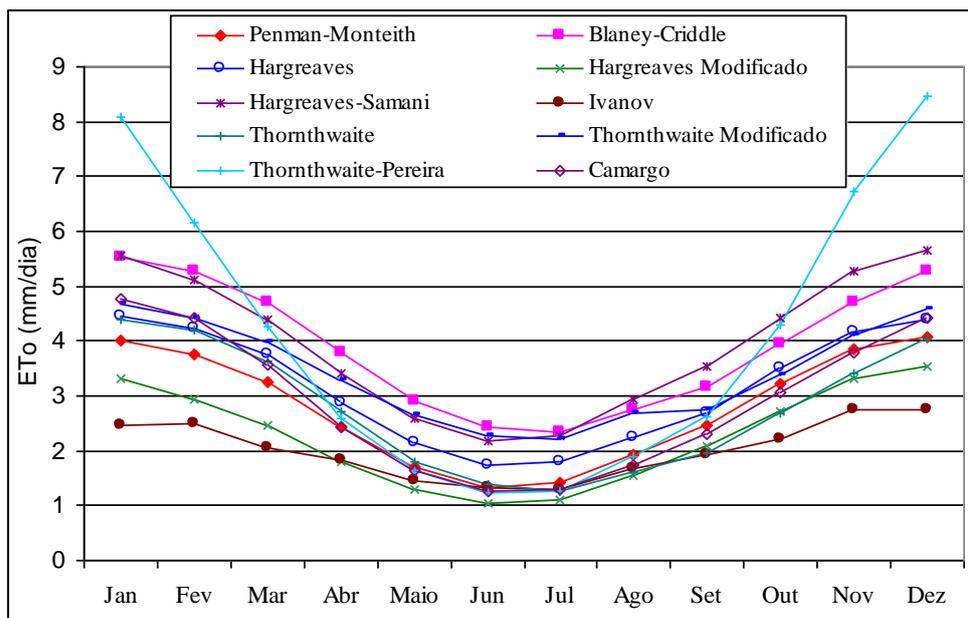


Figura 1. Valores médios mensais de ETo estimado pelos diversos métodos.

Tabela 2. Evapotranspiração de referência anual de Urussanga, SC.

Método	média (mm)	Desvio padrão (mm)	% em relação Penman-Monteith
Blaney-Criddle	1422,7	43,2	140,0
Hargreaves	1155,9	36,9	113,7
Hargreaves Modificado	825,7	33,2	81,2
Hargreaves-Samani	1438,8	44,4	141,6
Ivanov	735,3	58,2	72,3
Thornthwaite	1005,6	48,2	98,9
Thornthwaite Modificado	1244,3	54,6	122,4
Thornthwaite Modificado2	1494,9	57,1	147,1
Camargo	1052,5	34,4	103,6
Penman-Monteith	1016,4	34,3	100,0

Observa-se que o método de Hargreaves modificado e o método de Ivanov subestimam os valores mensais de ETo quando comparado com o método de PM. No método de Ivanov, os valores de ETo estimado para os meses de dezembro a março são abaixo de 70 % dos valores estimados pelo método de PM. Os valores mensais de ETo estimados pelo método de Hargreaves modificado ficam entre 75 a 88 % do estimado pelo método de PM. No método de Thornthwaite, observa-se que, nos meses de janeiro a junho, os valores estimados são de 3 a 10 % superiores aos estimados pelo método de PM e nos demais meses os valores são menores, sendo no mês de setembro 80 % dos estimados pelo método de PM. No método de Thornthwaite modificado por Camargo, houve variação semelhante, com superestimativa nos meses de dezembro a abril, e subestimativa nos meses de maio a novembro. O método de Thornthwaite modificado por Pereira apresentou grandes diferenças com estimativas de 200% do valor estimado pelo método PM no mês de janeiro e 89 % do estimado no mês de julho.

Os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado superestimaram os valores de ETo em todos os meses do ano. No método de Blaney-Criddle, as superestimativas variaram de 21 % em novembro até 82 % em junho. No método de Hargreaves, as superestimativas variaram de 8% em novembro a 30 % em junho, enquanto que, no método de Hargreaves-Samani, essas superestimativas variaram entre 35 % no mês de março a 62% no mês de junho. No método de Thornthwaite modificado, as superestimativas variaram de 4 % no mês de outubro a 69 % no mês de junho.

A evapotranspiração média anual estimada pelo método de Penman-Monteith foi de 1016,4 mm, com intervalo de confiança de 95 %, variando entre 1003,1 mm a 1029,0 mm. O método de Blaney-Criddle estimou o valor de 1422,7 mm, correspondendo a 140 % do valor estimado pelo método PM. O método de Hargreaves estimou valor de 1155,9 mm correspondendo a 113,7% do valor estimado pelo método de PM, e o método de Hargreaves modificado estimou o valor de 825,7mm, correspondendo a 81,2 % do estimado pelo método de PM. Também o método de Ivanov subestimou o valor anual de ETo, com valores de 72,7% do estimado pelo método de PM. No total anual os métodos de Thornthwaite e o método de Camargo, foram os que mais se aproximaram do método de PM, com valores de 98,9% e 103,6%, respectivamente. Os demais métodos estimaram valores superiores ao método de PM, com valores de 113,7; 122,4; 140,0; 141,6 e 147,1 % para os métodos de Hargreaves, Thornthwaite modificado, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado por Pereira, respectivamente. Amatya et al. (1995) obtiveram resultados semelhantes para os métodos de Hargreaves-Samani de Thornthwaite. Silva et al. (2001)

também observaram subestimativas do método de Hargreaves em relação ao método de Penman-Monteith calculados em intervalos mensais e semanais de Campina Grande.

Nas Figuras 2 a 10, são representados os diagramas de dispersão entre os valores de ETo estimados pelo método de PM (variável dependente) e a ETo estimado pelos demais métodos em intervalo mensal, decendial. Também são indicados a equação de regressão linear e o coeficiente de determinação R^2 . Nas Tabelas 3 e 4, constam os valores dos índices de desempenho e dos erros de estimativas para os dados de ETo calculado em intervalos mensal e decendial, respectivamente.

O método de Blaney-Criddle tende a superestimar os valores de ETo em relação ao método de Penman-Monteith (Figura 2), sendo esta superestimativa mais acentuada na escala mensal. O erro médio absoluto (EMA) na escala decendial foi de 0,413 mm (Tabela 3) e na escala mensal de 1,115 mm (Tabela 4). O desempenho foi classificado como péssimo na escala mensal, bom na escala decendial. Este resultado difere do obtido por Araujo et al. (2007), que nas condições climáticas de Roraima obtiveram desempenho considerado satisfatório pelo método de Blaney-Criddle. O fraco desempenho obtido pelo método de Blaney-Criddle pode ser explicado pelo fato do método ter sido desenvolvido para condições semi-áridas dos Estados Unidos, não se ajustando às condições do clima da região em estudo. O método de Hargreaves apresentou desempenho ótimo, com erro padrão de estimativa de 0,411mm no intervalo decendial e 0,406 mm no intervalo mensal, sendo o método que apresentou o menor erro padrão de estimativa. O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,9838 para intervalo mensal e 0,9787 para intervalo decendial (Figura 3). O ótimo desempenho do método de Hargreaves pode ser explicado pelo fato de considerar, além da temperatura, a radiação na superfície. O método de Hargreaves modificado apresentou bom no intervalo decendial, passando para muito bom no intervalo mensal. Embora o método Hargreaves modificado tenha apresentado desempenho ligeiramente inferior ao método original, constitui-se de boa alternativa para estimativas de ETo em intervalos mensais quando não há informação da radiação na superfície. Como o método subestima os valores de ETo, pode-se fazer a correção pelas equações da regressão linear indicada na Figura 4, com valores de R^2 de 0,9519 para intervalo mensal e R^2 de 0,9341 para intervalo decendial. O método de Hargreaves-Samani apresentou R^2 superior a 0,94, no entanto o índice de exatidão d inferior a 0,40, determinando desempenho péssimo ($c < 0,40$) para intervalo mensal e decendial, com erro padrão de estimativa superior a 1,19 mm. Resultados semelhantes para o método de Hargreaves-Samani foram obtidos por Carvalho et al. (2006) e Araujo et al. (2007). Os resultados obtidos pelo método de Hargreaves-Samani indicam que ele não deve ser usado diretamente nas condições do local em estudo, possivelmente pelo fato de que este método foi desenvolvido para as condições semi-áridas. Souza e Yoder (1994), Camargo e Sentelhas (1997), Medeiros (1996) e Medeiros (2002) também encontraram superestimativas de ETo pelo Método de Hargreaves-Samani em relação ao método de Penman-Monteith. Pela figura 5, observa-se que, com as devidas correções, o método pode ser aplicado na região em estudo.

O método de Ivanov apresentou desempenho classificado como mau para intervalo decendial e mensal, com índice de concordância d inferior a 0,5. Observa-se que os métodos Ivanov, assim como de Hargreaves modificado, que incluem a umidade relativa no cálculo, subestimam os dados de ETo. O método de Ivanov apresentou valores baixos de índice de concordância e de desempenho e os menores valores do coeficiente de determinação R^2 (Figura 6) e por isso não é indicado para a região.

O método original de Thornthwaite foi classificado como desempenho bom em intervalos decendial e muito bom na escala mensal, com erro padrão de estimativa de 0,613 mm e 0,487 mm, respectivamente. Resultado semelhante foi obtido por Medeiros (2002). O

método de Thornthwaite modificado apresentou desempenho inferior ao método original; no entanto, os valores do coeficiente de determinação R^2 foram superiores (Figura 8). O método de Thornthwaite modificado por Pereira apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,896 para intervalo mensal e R^2 de 0,8724 para intervalo decendial. Observa-se na Figura 1 que a correção proposta em função da duração da noite e dia não se mostrou adequada para os dados de Urussanga, onde a duração do dia (N) varia entre 10,2 horas até 13,7 horas, e, com isso, o fator de correção varia de 0,74 no solstício de inverno até 1,33 no solstício de verão, fazendo com que o método subestime a ETo no inverno e superestime nos meses de verão. O método de Camargo teve desempenho muito bom para escala decendial e mensal, mostrando erros ligeiramente menores que o método original de Thornthwaite. Estes resultados concordam com resultados obtidos por Medeiros (1998), que obteve desempenho “muito bom” para o método de Camargo nas condições climáticas de Santa Maria –RS. Conceição & Mandelli (2005) também observaram similaridade entre os métodos original de Thornthwaite e o método de Camargo, o que segundo estes autores é esperado, pois o método de Camargo foi desenvolvido com base no método de Thornthwaite. Embora os métodos de estimativa de ETo com base nos dados de temperatura sejam recomendados para cálculos em intervalos mensais, observa-se que nos métodos de Hargreaves, Hargreaves modificado, Thornthwaite e de Camargo o desempenho em intervalos decendiais foi classificado como bom ou superior.

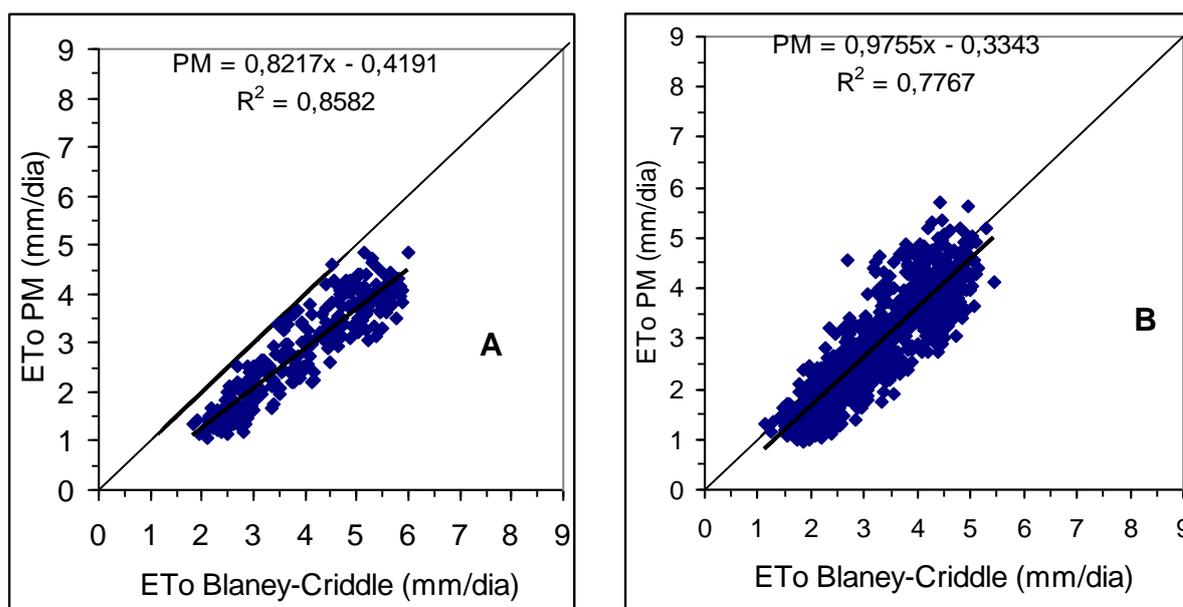


Figura 2. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Blaney-Criddle para intervalos mensais (A), decendiais (B).

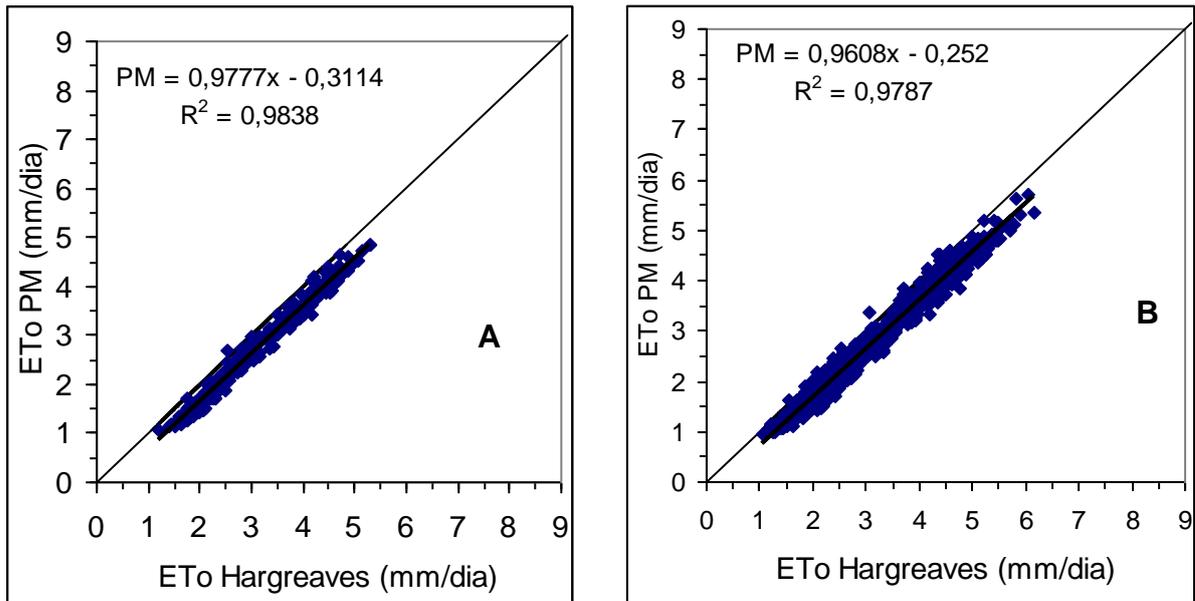


Figura 3. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Hargreaves para dados mensais (A), decenciais (B).

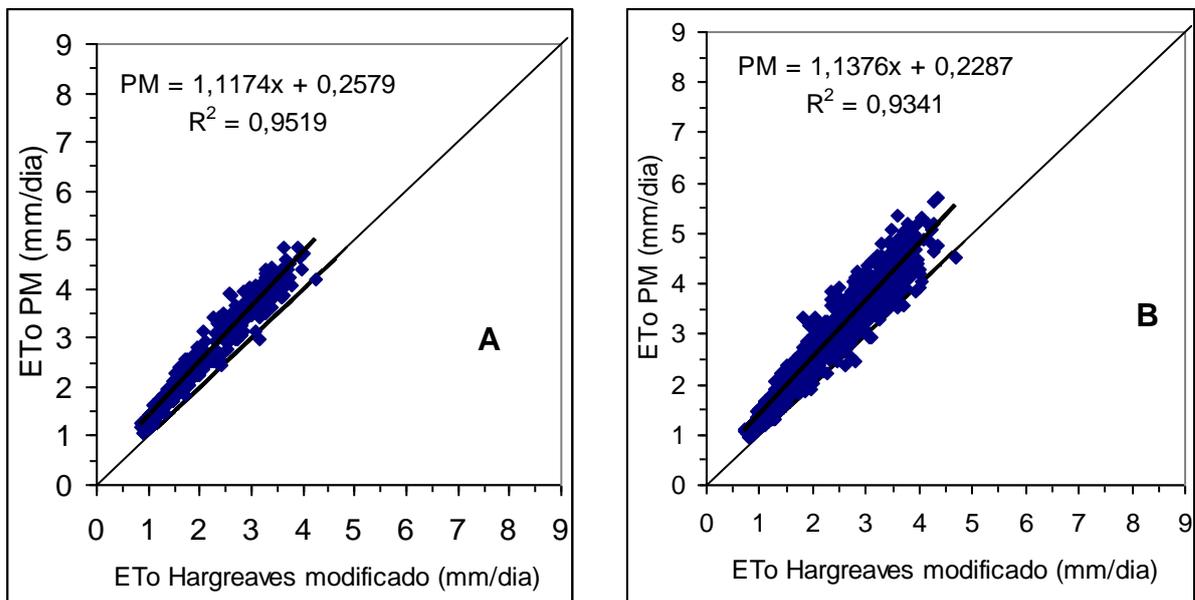


Figura 4. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Hargreaves modificado para dados mensais (A), decenciais (B).

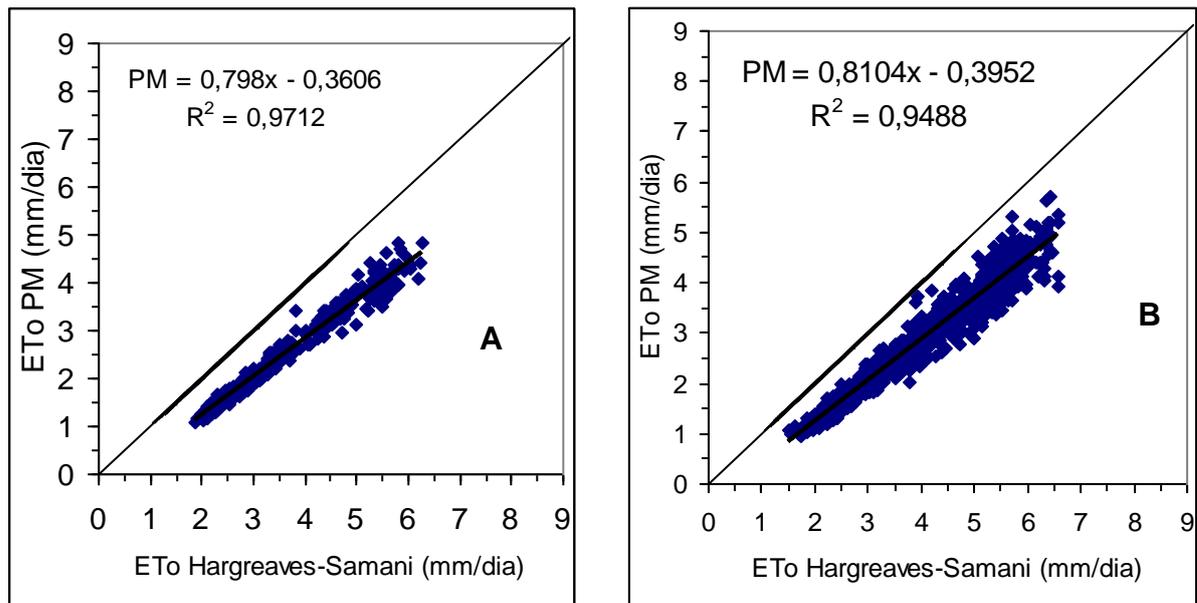


Figura 5. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Hargreaves-Samani para intervalos mensais (A), decendiais (B).

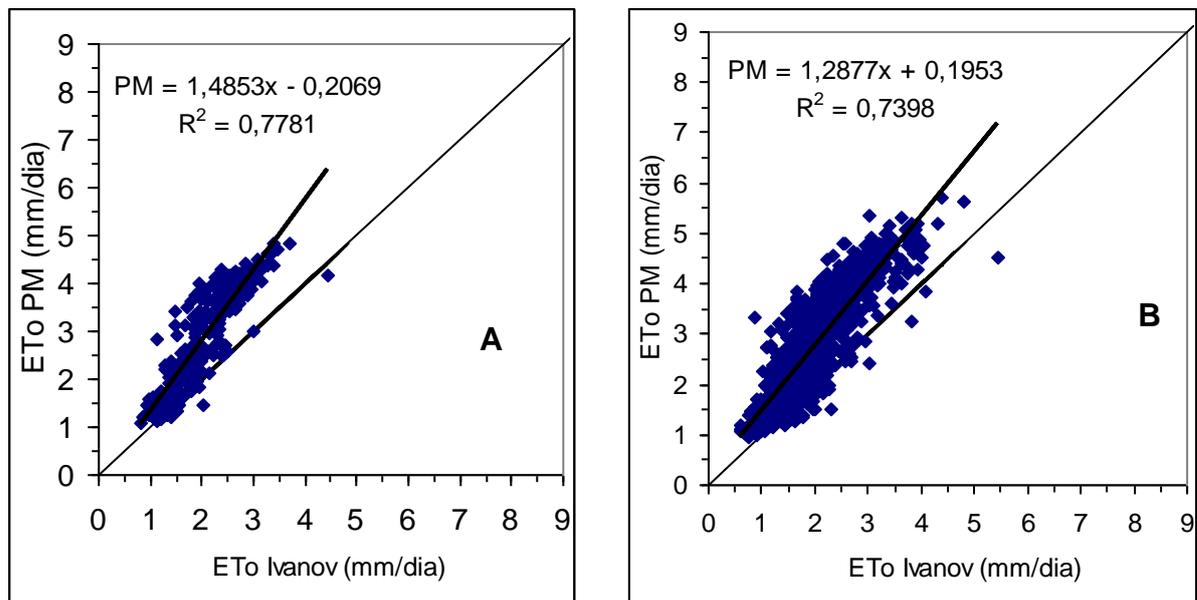


Figura 6. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Ivanov para intervalos mensais (A), decendiais (B).

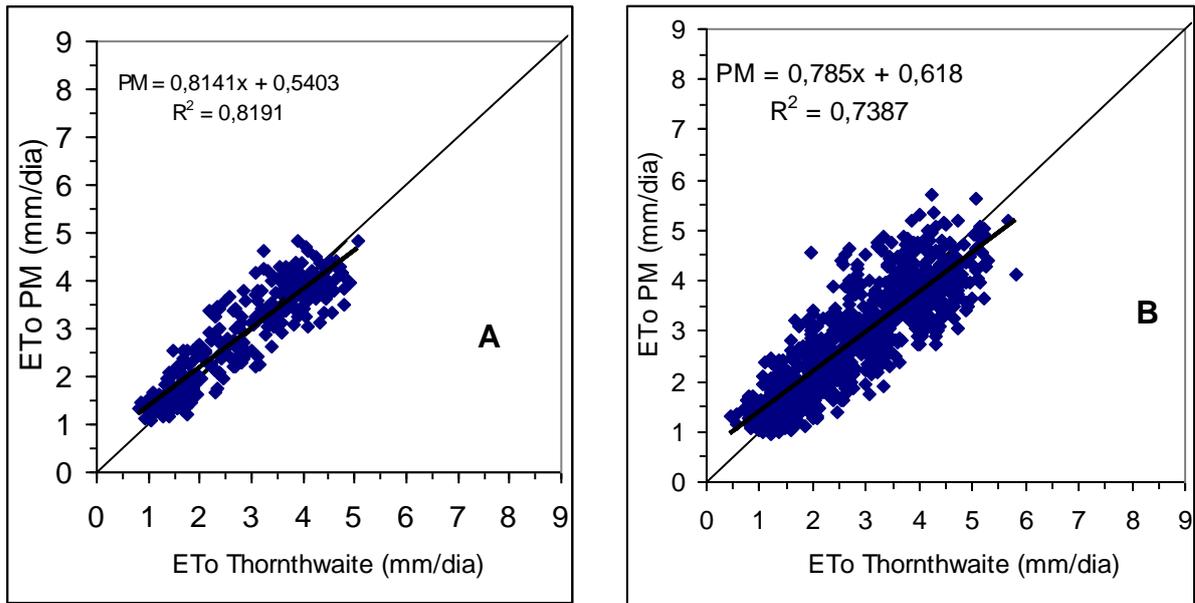


Figura 7. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Thornthwaite para intervalos mensais (A), decendiais (B).

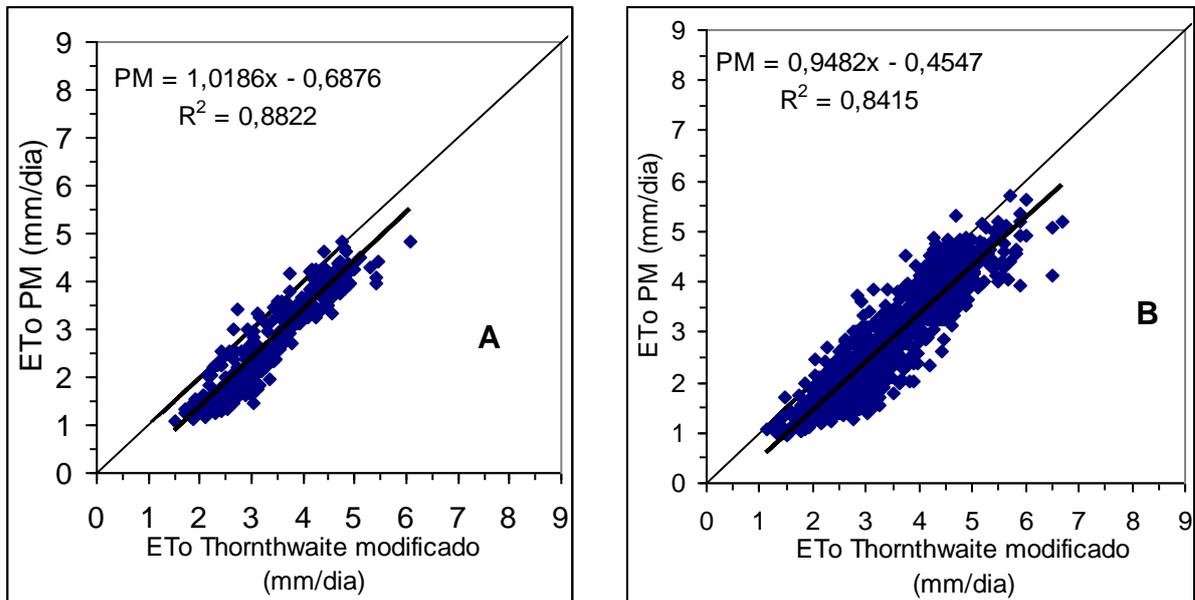


Figura 8. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Thornthwaite modificado para intervalo mensal (A) e decendial (B).

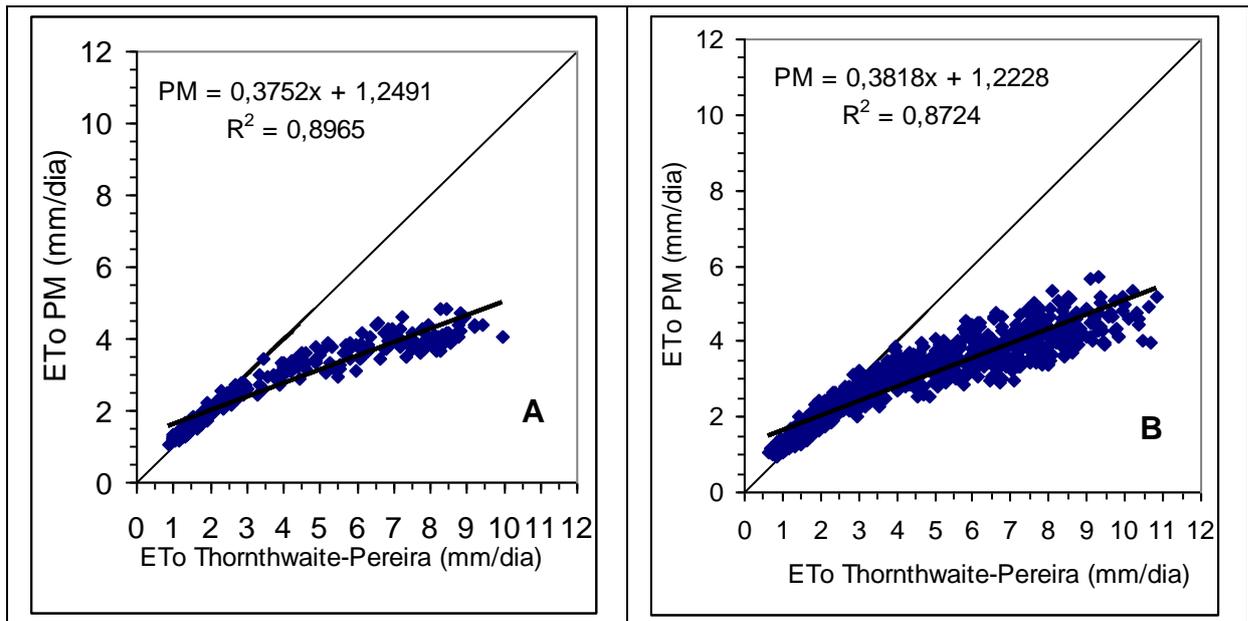


Figura 9. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Thornthwaite-Pereira para intervalos mensais (A), decendiais (B).

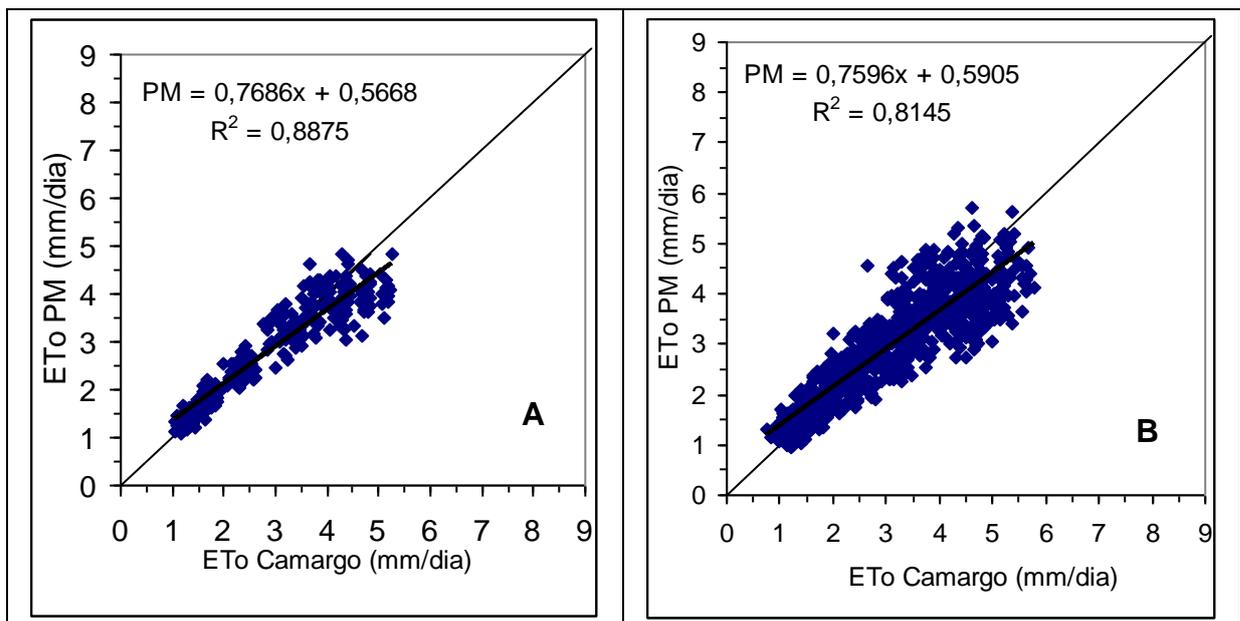


Figura 10. Regressão linear entre a evapotranspiração estimado pelo Método de Penman-Monteith (PM) e o método de Camargo para intervalos mensais (A), decendiais (B).

Tabela 3. Índices de exatidão “d” e de desempenho “c”, erro médio absoluto (EMA), Erro máximo (Em), Erro aleatório (Ea), erro sistemático (Es) e erro padrão de estimativa (Epe) para os diferentes métodos de estimativa de ETo em intervalos decendiais comparados com o método de Penman-Monteith para Urussanga, SC.

Método	índice			erros				
	d	c	desempenho	EMA	Em	Ea	Es	Epe
Blaney-Criddle	0,764	0,673	Bom	0,413	1,892	0,215	0,220	0,660
Hargreaves	0,913	0,903	Ótimo	0,376	0,917	0,027	0,142	0,411
Hargreaves modificado	0,792	0,765	Bom	-0,539	1,733	0,056	0,328	0,621
Hargreaves-Samani	0,390	0,380	Péssimo	1,141	2,646	0,087	1,337	1,195
Ivanov	0,487	0,419	Mau	-0,776	2,427	0,137	0,817	0,978
Thornthwaite	0,811	0,697	Bom	-0,021	2,620	0,370	0,005	0,613
Thornthwaite modificado	0,693	0,636	Mediano	0,632	2,383	0,175	0,415	0,769
Thornthwaite-Pereira	0,362	0,338	Péssimo	1,323	6,724	0,902	3,701	2,148
Camargo	0,842	0,760	Muito Bom	0,107	1,976	0,309	0,018	0,573

Tabela 4. Índices de exatidão “d” e de desempenho “c”, erro médio absoluto (EMA), Erro máximo (Em), Erro aleatório (Ea), erro sistemático (Es) e erro padrão de estimativa (Epe) para os diferentes métodos de estimativa de ETo em intervalos mensais comparados com o método de Penman-Monteith para Urussanga, SC.

Método	índice			erros				
	d	c	desempenho	EMA	Em	Ea	Es	Epe
Blaney-Criddle	0,346	0,321	Péssimo	1,115	2,255	0,189	1,245	1,201
Hargreaves	0,912	0,905	Ótimo	0,382	0,739	0,017	0,146	0,406
Hargreaves modificado	0,812	0,793	Muito bom	-0,524	1,322	0,038	0,297	0,581
Hargreaves-Samani	0,377	0,372	Péssimo	1,157	2,112	0,046	1,389	1,202
Ivanov	0,479	0,422	Mau	-0,771	2,068	0,082	0,833	0,960
Thornthwaite	0,878	0,795	Muito bom	-0,027	1,399	0,234	0,001	0,487
Thornthwaite modificado	0,719	0,676	Bom	0,624	1,549	0,105	0,408	0,719
Thornthwaite-Pereira	0,405	0,383	Péssimo	1,313	5,934	0,691	3,747	2,114
Camargo	0,895	0,844	Muito Bom	0,102	1,605	0,177	0,035	0,463

6 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, podem ser tiradas as seguintes conclusões, válidas para Urussanga, SC:

- Os métodos de Ivanov e de Hargreaves-Samani subestimaram a evapotranspiração em relação ao método de Penman-Monteith em todos os meses do ano;
- Os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves modificado e Thornthwaite modificado superestimaram os valores de ETo em todos os meses do ano;
- O método de Hargreaves apresentou desempenho ótimo tanto para intervalo mensal quanto decendial, com o menor erro padrão de estimativa;
- Os métodos de Thornthwaite e o método de Camargo apresentam desempenho muito bom na escala mensal, estimando valores de ETo total anual de 98,9 % e 103,6 % do estimado pelo método de Penman-Monteith.

- Os métodos de Blaney-Criddle, Hargeaves-Samani e Thornthwaite modificado por Pereira apresentaram desempenho péssimo em intervalos mensais, não sendo indicados para a região em estudo.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. **Caatinga**, Mossoró, v.20, n.4, p.84-88, 2007.

AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. Comparison of methods for estimating ref-ET. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n.6, p.427-435, 1995.

ALLEN, R. G. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, n.4, p.348-368, 1986.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy J.**, Madison, v. 81, n.4, p.650-662. 1989.

ALLEN, R. G. PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301p. (Irrigation and drainage paper, 56).

CAMARGO, A. P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.252-257, 1999.

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.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região Seropédica – RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.14, n.2, p.187-195, 2006.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, p.229-236, 2003.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.2, p.303-307, 2005.

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

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.2, p.250-255, 2005.

HENRIQUE, F. A. N. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande – PB. Campina Grande. 2006. 102p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande.

HARGREAVES, G. H. **Potential evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil**. Logan: Utah State University, 1974. 123p.

JENSEN, M. E; BURMAN, R.D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 329p. (ASCE Manual and Report on Engineering Practice, 70)

LIMA, A. S. F. F. **Comparação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para o município de Ribeirão Preto-SP**. Piracicaba: USP, 1991. 169p.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência através do programa REF-ET, para duas localidades do Nordeste**. 1996. 95p. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará.

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

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraíba, CE**. Piracicaba, 2002. 103p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

PEREIRA, F. A. C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. 87 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba,

PERES, J. G. **Avaliação de modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do Estado de São Paulo**. 1994. 116p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1. p.1-12, 1996.

SEDIYAMA, G. C. Necessidade de água para os cultivos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSINO AGRÍCOLA SUPERIOR. **Curso de engenharia de irrigação**, módulo 4. Brasília, 1988. p.238-249.

SILVA, V. P. R.; DANTAS, R. T.; CAMPOS, J. H. B. C; GUEDES, M. J. F. Estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith-FAO/56, Hargreaves e Tanque Classe A em períodos diários e mensais. In XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, v.2, n.2, 2001, p467-468.

SOUZA, F. de; YODER, R. **ET estimation in de northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith equation**. St Joseph: ASAE, 1994. 6p.

WILLMOTT, C. J. CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n C5, p.8895-9055,1985.