

MÉTODOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA AQUIDAUANA, MS

EDER DUARTE FANAYA JÚNIOR¹; ADRIANO DA SILVA LOPES²; GABRIEL QUEIROZ DE OLIVEIRA³ e LEANDRO HENRIQUE JUNG⁴

¹Engenheiro Agrônomo, Bolsista de Mestrado da CAPES em Agronomia (Produção Vegetal), Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana – MS. junior_edf21@hotmail.com.

²Engenheiro Agrônomo, Prof. Adjunto, Tutor e Bolsista PET, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana – MS. lopes@uemms.br.

³Engenheiro Agrônomo, Bolsista de Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) do CNPq, Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias, Dourados, MS. gabrielqo@hotmail.com

⁴Engenheiro Agrônomo, Bolsista de Mestrado da CAPES, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana – MS. ljung61@hotmail.com.

1 RESUMO

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), tem sido uma importante ferramenta para o manejo da irrigação e, deve-se eleger um método em função dos elementos climáticos disponíveis, a partir daí, verificar quais podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para certo local de interesse fica na dependência dessas variáveis e da precisão das estimativas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos empíricos de ET_o: Benevides-Lopes, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley & Taylor e Turc, nas escalas diária, quinzenal e mensal, comparando com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56, na região de Aquidauana, MS. As variáveis climáticas utilizadas foram obtidas na rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situado em Aquidauana, entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010. Para a comparação dos valores de ET_o estimados por meio das equações empíricas com os do método padrão, foram considerados os seguintes parâmetros: equação de regressão (a e b), coeficiente de determinação (r²), índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c). Para as médias das estimativas diárias, quinzenais e mensais, o método de Priestley & Taylor obteve o melhor desempenho dentre os analisados neste trabalho, seguido pelo método de Hargreaves-Samani que utiliza apenas dados de temperatura e apresentou melhor desempenho no período quinzenal.

Palavras-chave: Penman-Monteith; elementos climáticos; irrigação.

**FANAYA JÚNIOR, E. D.; LOPES, A. da S.; OLIVEIRA, G. Q. de; JUNG, L. H.
EVALUATION OF EMPIRICAL METHODS TO ESTIMATE
EVAPOTRANSPIRATION REFERENCE IN AQUIDAUANA, MS - BRAZIL**

2 ABSTRACT

The estimate evapotranspiration reference (ET_o) is an important tool in managing irrigation and one must choose a method on the basis of climate elements available, from then on, there is a need to check which method can be applied, since the use of different methods to certain places is dependent of these variables and on the estimative precisions. The objective of this

study was to evaluate the performance of some empirical methods to estimate ETo, comparing them with the standard Penman-Monteith in Aquidauana, MS. The climatic variables used were obtained through the stations network of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), located in Aquidauana between January 2008 and December 2010. To compare ETo values estimated by the empirical equations with the standard method, the following parameters were considered: regression equation (a and b), determination coefficient (r^2), agreement index (d) and the performance index (c). For the mean estimates of daily, fortnightly and monthly, the Priestley & Taylor method had the best performance among those analyzed in this study, followed by the Hargreaves-Samani method which uses only temperature data and showed better performance during two weeks.

Keywords: Penman-Monteith, climatic elements, irrigation.

3 INTRODUÇÃO

A água tem sido um recurso natural de extrema necessidade e importância para o homem desde a descoberta de que a produção de alimentos dependia da oferta de água utilizada no cultivo. Nos tempos atuais, um dos desafios da humanidade é o atendimento à demanda por água de boa qualidade sendo que alguns fatores podem gerar sérios problemas ao abastecimento de água pelos próximos anos, como o crescimento populacional de forma exponencial, a necessidade de produção de alimentos para a população e o desenvolvimento industrial (Grassi, 2011).

Um dos principais componentes do ciclo hidrológico é a evapotranspiração que tem por definição, segundo Mendonça et al. (2003), como a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água no solo e da transpiração das plantas. A precisão de sua estimativa é de grande importância para diversos estudos, como balanço hidrológico, modelagem dos processos climatológicos, projetos, manejos de irrigação, simulação de produtividade de culturas e planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (Back, 2008).

Evapotranspiração de referência (ETo) é aquela presente em uma extensa superfície que possui vegetação rasteira, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 0,08 e 0,15 m, sem restrição hídrica. Para a definição, vale ressaltar que, a vegetação rasteira “grama” é definida especificamente como a cultura de referência, e essa cultura é considerada livre de estresse hídrico e de doenças (Mendonça et al., 2003).

Dentre os vários métodos que existem para se estimar a ETo, os quais utilizam dados meteorológicos e agrônômicos, destaca-se o método de Penman-Monteith, por apresentar um melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, sendo, por este motivo, recomendado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) como o modelo padrão para a estimativa da ETo e calibração de métodos empíricos (Allen et al., 1998). Camargo & Camargo (2000) também enfatizam que o método de Penman-Monteith- FAO, prediz com eficiência a ETo em diversas condições de umidade atmosférica necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões.

Com isso, é importante, antes de se eleger o método a ser utilizado para a estimativa da ETo, saber quais os elementos climáticos disponíveis e, a partir daí, verificar quais métodos podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para certo local de interesse fica na dependência dessas variáveis (Araújo et al., 2007). Dessa maneira, é de grande importância a utilização de métodos empíricos de estimativa de ETo mais simples e

com boa precisão.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos empíricos para a estimativa da ETo: Benevides-Lopes, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley & Taylor e Turc, nas escalas diária, quinzenal e mensal, comparando com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56, na região de Aquidauana, MS.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado utilizando dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2008 e 31 dezembro de 2010 na estação meteorológica automática, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente da unidade situada em Aquidauana, MS, com coordenadas geográficas 20° 20' Sul, 55° 48' Oeste e altitude média de 155 m. O clima da região é classificado, segundo KÖPPEN, como do tipo Aw, tropical quente sub-úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno e precipitação pluviométrica anual média de 1200 mm.

Os dados coletados, em períodos diários, foram: temperatura do ar (°C); umidade relativa do ar (%), velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}) e radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). Pode-se observar na Tabela 1 as médias mensais dos dados coletados entre janeiro de 2008 e dezembro de 2010.

Tabela 1. Temperatura do ar máxima (Tmax) e mínima (Tmin), umidade relativa do ar máxima (URmax) e mínima (URmin), velocidade do vento a 2m de altura (U_2) e radiação solar global (Rs) de janeiro de 2008 a dezembro de 2010 em Aquidauana, MS.

| Mês | Tmax | Tmin | URmax | URmin | U_2 | Rs |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------------------------|
| | °C | | % | | m s^{-1} | $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ |
| JAN | 32,33 | 22,69 | 93,35 | 55,84 | 1,47 | 21,94 |
| FEV | 33,32 | 23,09 | 92,78 | 52,92 | 1,41 | 23,65 |
| MAR | 33,61 | 22,25 | 92,92 | 48,95 | 1,22 | 23,33 |
| ABR | 32,74 | 19,37 | 91,31 | 43,13 | 1,25 | 20,09 |
| MAI | 28,91 | 16,31 | 93,11 | 48,68 | 1,26 | 16,67 |
| JUN | 28,21 | 15,11 | 91,97 | 46,53 | 1,24 | 14,18 |
| JUL | 29,91 | 15,15 | 88,27 | 38,61 | 1,36 | 17,18 |
| AGO | 31,76 | 16,01 | 83,89 | 33,97 | 1,50 | 17,28 |
| SET | 32,10 | 18,57 | 79,81 | 37,26 | 1,93 | 19,37 |
| OUT | 33,06 | 20,72 | 88,48 | 44,48 | 1,65 | 20,38 |
| NOV | 33,56 | 21,59 | 90,98 | 47,52 | 1,58 | 23,23 |
| DEZ | 33,99 | 22,96 | 90,14 | 49,62 | 1,55 | 25,66 |
| Média | 31,96 | 19,48 | 89,75 | 45,63 | 1,45 | 20,25 |

Os métodos utilizados para a estimativa da ETo foram: Benevides-Lopes, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley & Taylor e Turc. Todos foram comparados ao método de Penman-Monteith, considerado padrão pela FAO.

4.1 Método de Penman-Monteith (PM)

Este é o método recomendado pela FAO, que considera a altura da grama fixada em 0,12 m, a resistência estomática de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. O valor do fluxo de calor no solo foi considerado igual a zero. Sua estimativa se dá utilizando a equação 1 (Allen et al., 1998):

$$ET_{O_{(PM)}} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900 U_2}{T_{med} + 273} \right) (es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad [1]$$

Em que:

$ET_{O_{(PM)}}$ = Evapotranspiração de referência pelo método Penman-Monteith, mm dia^{-1} ;

Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

R_n = saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

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

γ = constante psicrométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

U_2 = velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo, m s^{-1} ;

T_{med} = temperatura média do ar, $^\circ\text{C}$;

es = pressão de saturação de vapor, kPa ;

ea = pressão atual de vapor, kPa .

4.2 Método de Benavides-Lopez (BL)

Na equação 2, verifica-se o método que foi desenvolvido por Garcia Benavides e Lopez Diaz (1970) e, baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar (Pereira et al., 1997):

$$ET_{O_{BL}} = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,45 T_{med}}{234,7 + T_{med}} \right)} (1 - 0,01 UR) + 0,21 T_{med} - 2,30 \quad [2]$$

Em que:

$ET_{O_{(BL)}}$ = evapotranspiração de referência segundo o método de Benevides-Lopes, mm dia^{-1} ;

T_{med} = Temperatura média do ar, $^\circ\text{C}$;

UR = Umidade relativa do ar, %.

4.3 Método de Hamon (HA)

Este método foi desenvolvido por Hamon em 1961, onde o autor evidenciou que o método de Thornthwaite superestimava a evapotranspiração no verão e subestimava no inverno. O método inclui o efeito da insolação, incorporando a duração do dia, baseado na latitude, e utiliza dados de temperatura do ar para obter a pressão de vapor de saturação, no qual é expressa pela equação 3 (Pereira et al., 1997):

$$ET_{O_{(HA)}} = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,93 \exp^{(0,062 T_{med})}}{100} \right) 25,4 \quad [3]$$

Em que:

$ETo_{(HA)}$ = evapotranspiração de referência segundo o método de Hamon, $mm\ dia^{-1}$;
 N = número de horas de brilho solar possíveis (fotoperíodo);
 T_{med} = Temperatura média do ar, $^{\circ}C$.

4.4 Método de Hargreaves-Samani (HS)

Este método foi desenvolvido por Hargreaves e Samani (1985), na Califórnia, em condições semi-áridas, a partir de dados obtidos em lisímetros com gramado e descrito conforme equação 4 (Pereira et al., 1997):

$$ETo_{(HS)} = 0,0135kt Ra (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad [4]$$

Em que:

$ETo_{(HS)}$ = evapotranspiração de referência segundo método Hargreaves - Samani, $mm\ dia^{-1}$;
 Ra = radiação extraterrestre, $mm\ dia^{-1}$;
 $T_{máx}$ = temperatura máxima do ar, $^{\circ}C$;
 $T_{mín}$ = temperatura mínima do ar, $^{\circ}C$.
 T_{med} = temperatura média do ar, $^{\circ}C$;
 kt = coeficiente empírico empregado em regiões continentais (0,162), adimensional.

4.5 Método de Jensen-Haise (JH)

Jensen e Haise desenvolveram a equação (5) para estimativa da ETo em regiões áridas (Pereira et al., 1997):

$$ETo_{(JH)} = R_s (0,025T_{med} + 0,08) \quad [5]$$

Em que:

$ETo_{(JH)}$ = evapotranspiração de referência segundo o método de Jensen-Haise, $mm\ dia^{-1}$.
 R_s = radiação solar global convertida em unidades de água evaporada, $mm\ dia^{-1}$.
 T_{med} = temperatura diária média do ar, $^{\circ}C$.

4.6 Método de Priestley & Taylor (PT)

Também utilizado na estimativa da ETo , constitui-se em uma aproximação do método de Penman. Nesta equação, permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico “ α ”, conhecido como parâmetro de Priestley & Taylor (1972), o qual incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico (Equação 6).

$$ETo_{(PT)} = \frac{\alpha \frac{(\Delta + \gamma)}{\gamma} (R_n - G)}{\lambda} \quad [6]$$

Em que:

$ETo_{(PT)}$ = evapotranspiração de referência segundo o método de Priestley & Taylor, $mm\ dia^{-1}$;
 α = parâmetro de Priestley & Taylor (1,26), adimensional;
 R_n = saldo de radiação, $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$;

Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água, kPa °C⁻¹;
 γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹, adimensional;
 λ = fluxo de calor latente (2,45 MJ kg⁻¹).

4.6. Método de Turc (TU)

Em 1961, Turc estimou a ETo (equação 7), que foi desenvolvida para o oeste europeu, onde a umidade do ar é maior que 50% (Kashyap & Panda, 2001):

$$ET_{oTU} = a_t 0,013 \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \left(\frac{R_s / 0,0238846 + 50}{\lambda} \right) \quad [7]$$

Em que:

$ET_{o(TU)}$ = evapotranspiração de referência segundo o método de Turc, mm dia⁻¹;

T_{med} = temperatura média do ar, em °C;

R_s = radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹),

λ = calor latente de vaporização (2,45 MJ mm⁻¹);

UR = umidade relativa do ar, (%);

a_t = fator da umidade relativa. Se a umidade relativa (UR) do ar for maior ou igual a 50%, $a_t = 1,0$, senão calcula-se pela equação (8), adimensional:

$$a_t = 1 + \frac{50 - UR}{70} \quad [8]$$

4.7. Análise dos dados

Foi realizada análise de desempenho comparando os valores de ETo, obtidos pelos métodos empíricos, com o método universal padrão Penman-Monteith. Realizou-se a análise de correlação e regressão linear para obtenção dos coeficientes da equação ($Y = a + bx$) e, do coeficiente de determinação (r^2). Para a exatidão dos métodos empíricos, foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985), do índice de desempenho (c), e da estimativa do erro padrão (EEP) descrita por Allen et al. (1986), obtidos pelas equações 9, 10 e 11 e, os valores do índice “c”, interpretados de acordo com a Tabela 2 (Camargo & Sentelhas, 1997).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad [9]$$

Em que:

d = índice de concordância;

P_i = valores estimados pelos métodos;

O_i = valores estimados pelo método padrão, Penman-Monteith;

\bar{O} = média dos valores estimados pelo método padrão.

$$c = r d \quad [10]$$

Em que:

c = índice de desempenho;
r = coeficiente de correlação;

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad [11]$$

Em que:

EEP = Estimativa do erro padrão, em mm dia⁻¹;

O_i = valores estimados pelo método padrão, Penman-Monteith, em mm dia⁻¹;

P_i = corresponde aos valores estimados pelos métodos, em mm dia⁻¹;

n = número de observações.

Tabela 2. Interpretação do desempenho dos métodos para a estimativa da ETo

| Valor do índice de desempenho "c" | Classificação |
|-----------------------------------|---------------|
| > 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 |
| ≤ 0,40 | Péssimo |

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997).

A indicação dos melhores métodos de estimativa da ETo para o município de Aquidauana, MS, foram segundo os critérios propostos por Camargo & Sentelhas (1997), estabelecendo prioritariamente e em ordem crescente, para os métodos que apresentaram os maiores índices de desempenho (c), sendo estes superiores a 0,65. Todos os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Office Excel®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta as médias mensais da estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) para o município de Aquidauana, MS, obtidas pelos métodos de Benevides-Lopes (EToBL); Hamon (EToHA); Hargreaves-Samani (EToHS); Jensen-Haise (EToJH); Priestley & Taylor (EToPT) e; Turc (EToTU), onde se observa a superestimativa de ETo durante todos os meses do ano para os métodos de EToBL, EToHS, EToJH e EToPT com os valores médios de diferenças de 0,90; 0,26; 1,73; 0,38 mm dia⁻¹, respectivamente, em relação ao método padrão Penman-Monteith (EToPM). No entanto, os métodos de EToHA e EToTU subestimaram a ETo em todos os meses do ano, apresentando os seguintes valores: -0,80 e -1,09 mm dia⁻¹.

Tabela 3. Médias da evapotranspiração de referência (ET_o) mensal pelos métodos de Penman-Monteith (ET_oPM); Benevides-Lopes (ET_oBL); Hamon (ET_oHA); Hargreaves-Samani (ET_oHS); Jensen-Haise (ET_oJH); Priestley & Taylor (ET_oPT) e; Turc (ET_oTU), entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

| MÊS | ET _o PM | ET _o BL | ET _o HA | ET _o HS | ET _o JH | ET _o PT | ET _o TU |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | mm dia ⁻¹ | | | | | | |
| JAN | 4,88 | 5,35 | 4,55 | 5,21 | 6,92 | 5,73 | 3,58 |
| FEV | 5,22 | 5,69 | 4,43 | 5,23 | 7,60 | 6,11 | 3,86 |
| MAR | 5,00 | 5,75 | 3,98 | 4,96 | 7,43 | 5,80 | 3,80 |
| ABR | 4,12 | 5,37 | 3,23 | 4,38 | 6,01 | 4,53 | 3,24 |
| MAI | 3,05 | 4,10 | 2,44 | 3,31 | 4,42 | 3,28 | 2,60 |
| JUN | 2,60 | 3,85 | 2,17 | 3,00 | 3,60 | 2,60 | 2,24 |
| JUL | 3,22 | 4,49 | 2,35 | 3,41 | 4,55 | 3,14 | 2,68 |
| AGO | 3,75 | 5,21 | 2,76 | 4,25 | 4,82 | 3,58 | 2,80 |
| SET | 4,66 | 5,82 | 3,34 | 4,78 | 5,71 | 4,37 | 3,19 |
| OUT | 4,79 | 5,76 | 3,99 | 5,37 | 6,33 | 5,10 | 3,33 |
| NOV | 5,27 | 5,75 | 4,49 | 5,74 | 7,33 | 5,97 | 3,76 |
| DEZ | 5,80 | 6,03 | 4,94 | 5,73 | 8,31 | 6,67 | 4,16 |
| MÉDIA | 4,36 | 5,26 | 3,56 | 4,62 | 6,09 | 4,74 | 3,27 |
| MI-PM* | - | 0,90 | -0,80 | 0,26 | 1,73 | 0,38 | -1,09 |

*MI-PM – Diferença entre as médias das evapotranspiração de referência dos métodos empíricos com a média do método padrão da FAO-56.

Dessa forma, por meio dos dados de estimativa de ET_o diários (Tabela 4) e da comparação dos métodos avaliados com o padrão (Figura 1), pode-se observar que o método que apresentou melhor desempenho foi o de ET_oPT com valor do índice de desempenho “c” classificado como Ótimo, apresentando coeficiente de correlação “r” de 0,95, índice de desempenho de 0,951 e estimativa de erro padrão (EEP) de 0,711 mm dia⁻¹.

Na seqüência, os métodos que apresentaram os índices de desempenho satisfatório foram ET_oHS, ET_oTU e ET_oJH com valores de desempenho de 0,768 (Muito bom), 0,750 (Bom) e 0,738 (Bom), respectivamente. Os métodos ET_oBL e ET_oHA apresentaram, respectivamente, os seguintes valores de desempenho 0,592 (Sofrível) e 0,542 (Sofrível).

Com estes resultados, pode-se inferir que os métodos indicados, para a região de Aquidauana, MS, são o método de ET_oPT, ET_oHS, ET_oTU e ET_oJH, por apresentarem os melhores índices de desempenho entre os métodos avaliados, sendo esses índices superiores a 0,65 (Camargo & Sentelhas, 1997).

Tabela 4. Desempenho dos métodos de estimativa da ET_o diário, entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

| Métodos | EEP (mm dia ⁻¹) | r | d | c | Desempenho |
|---------|-----------------------------|------|-------|------|------------|
| BL | 1,333 | 0,76 | 0,775 | 0,59 | Sofrível |
| HA | 1,249 | 0,76 | 0,718 | 0,54 | Sofrível |
| HS | 0,809 | 0,85 | 0,904 | 0,77 | Muito Bom |
| JH | 1,991 | 0,96 | 0,766 | 0,74 | Bom |
| PT | 0,711 | 0,95 | 0,951 | 0,90 | Ótimo |
| TU | 1,235 | 0,96 | 0,785 | 0,75 | Bom |

BL: método de Benevides-Lopes; HA: método de Hamon; HS: método de Hargreaves-Samani; JH: método de Jensen-Haise; PT: método de Priestley & Taylor; TU: método de Turc;; EEP: estimativa do erro padrão; r: coeficiente de determinação; d: coeficiente de concordância; c: coeficiente de desempenho.

Este resultado também foi observado por Silva et al. (2011), onde o método de Priestley & Taylor obteve índice de desempenho classificado como Ótimo em Uberlândia, MG. Segundo os autores, o ótimo desempenho desse método era esperado por ele se assemelhar ao método padrão, exigindo praticamente os mesmos elementos climatológicos, porém, à aplicação acaba sendo restringida para locais onde há carência de equipamentos para medi-los.

Pereira et al. (2009) chegaram a um resultado diferente ao deste trabalho, onde o método de Jensen-Haise foi um dos melhores analisados, tendo sido classificado como Ótimo para períodos chuvosos e Muito Bom para períodos secos e, o método de Prestley & Taylor foi classificado como Bom para período chuvoso e Péssimo para períodos secos, sendo o método Jensen-Haise o mais recomendado para as condições climáticas da região da Serra da Mantiqueira, MG, pois, segundo eles, os métodos de estimativa da ETo que empregam o uso da radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar. No entanto, de acordo com trabalho realizado por Oliveira et al. (2008), o método de Jensen-Haise, tanto na escala diária como na pentadial, apresentou desempenho Mediano.

Nesse sentido, Conceição & Mandelli (2005) observaram por meio da avaliação de adequabilidade de métodos que empregam temperatura do ar e radiação solar como variáveis de entrada, comparando-os aos valores diários estimados pelo método padrão – FAO, para a região de Bento Gonçalves, RS, que os melhores resultados foram obtidos com os métodos que empregam a radiação global incidente como variável.

Na região de Sobral, CE, o método de Hargreaves-Samani obteve desempenho Muito Bom, pois a boa confiabilidade dos métodos de estimativa da ETo que utilizam apenas a temperatura para a região pode ser justificada pela variação de temperatura e radiação solar no local (Gonçalves et al., 2009). Medeiros (2002) encontrou resultado controverso ao dos demais autores ao classificar o método de Hargreaves-Samani como Mau para o município de Paraipaba, CE, sendo justificado pela baixa variação de temperatura e radiação solar na região litorânea do Ceará.

Na Figura 1 encontra-se as funções do método padrão-FAO em relação aos métodos empíricos de estimativa de ETo, com valores dos coeficientes angulares (a), lineares (b) e determinação (r^2), no qual verifica-se que apenas os métodos de EToHA e EToTU apresentaram coeficiente angular acima de 1.

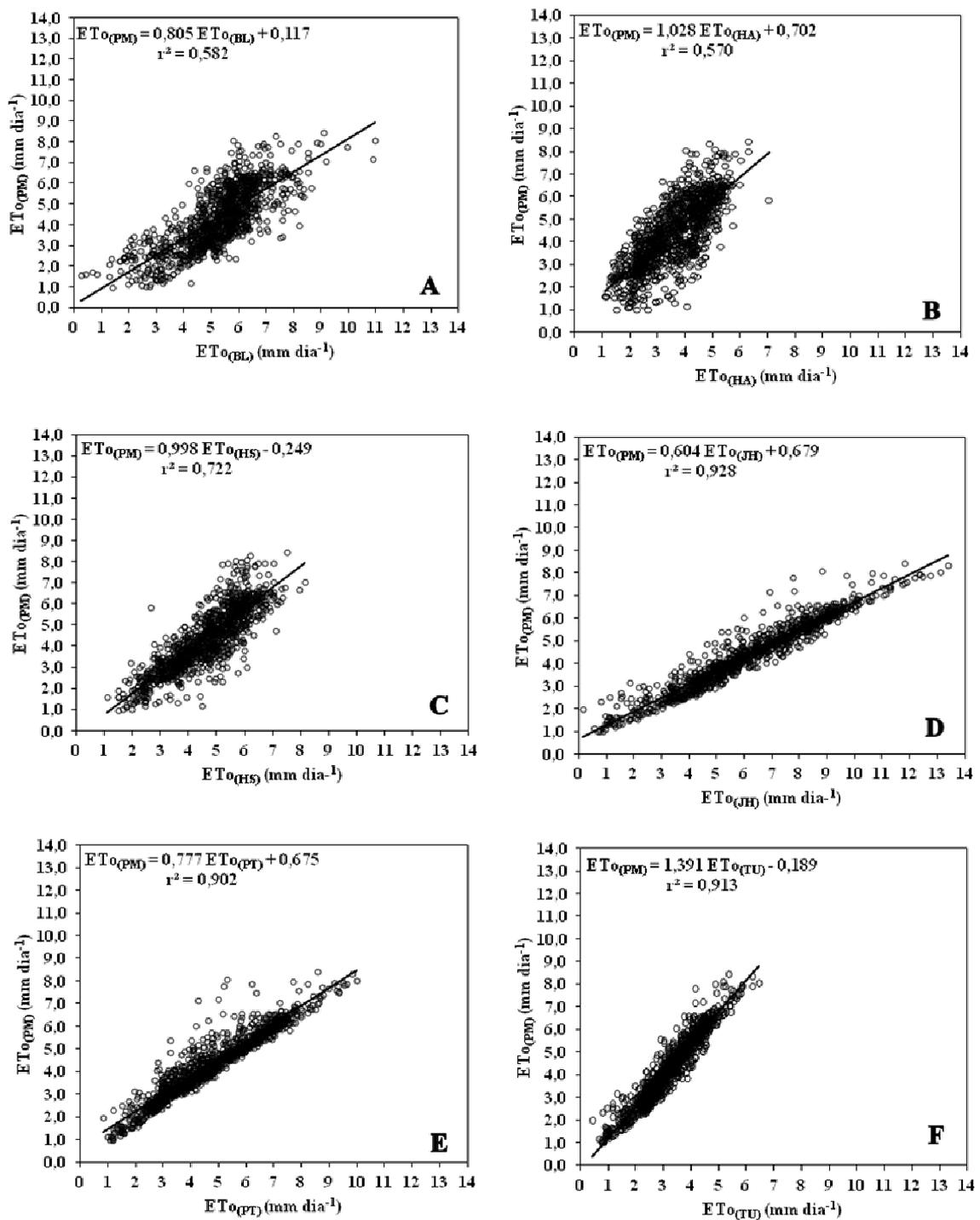


Figura 1. Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados pela comparação dos métodos de Benevides-Lopes (A), Hamon (B), Hargreaves-Samani (C), Jensen-Haise (D), Priestley & Taylor (E) e Turc (F), com o método padrão, Penman-Monteith, entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

Para o período quinzenal, observa-se que o coeficiente “c” dos métodos de ET_{oHS} e ET_{oPT} apresentaram valores de desempenho de 0,92 e 0,90, respectivamente, e foram

classificados como Ótimo, com EEP de 0,391 e 0,601 mm dia⁻¹, respectivamente (Tabela 5). Todos os métodos para o período quinzenal e mensal encontraram valores de coeficientes de correlação (r) acima de 0,85 - que é considerada forte.

O método de EToHA apresentou classificação Bom (0,74), já os métodos de EToBL (0,64), EToJH (0,63) e EToTU (0,62) foram classificados como Mediano.

Tabela 5. Desempenho dos métodos de estimativa da ETo quinzenal, entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

| Métodos | EEP (mm dia ⁻¹) | r | d | c | Desempenho |
|---------|-----------------------------|------|-------|------|------------|
| BL | 1,051 | 0,86 | 0,742 | 0,64 | Mediano |
| HA | 0,914 | 0,91 | 0,814 | 0,74 | Bom |
| HS | 0,391 | 0,96 | 0,963 | 0,92 | Ótimo |
| JH | 1,833 | 0,96 | 0,651 | 0,63 | Mediano |
| PT | 0,601 | 0,96 | 0,938 | 0,90 | Ótimo |
| TU | 1,185 | 0,97 | 0,644 | 0,62 | Mediano |

BL: método de Benevides-Lopes; HA: método de Hamon; HS: método de Hargreaves-Samani; JH: método de Jensen-Haise; PT: método de Priestley & Taylor; TU: método de Turc;; EEP: estimativa do erro padrão; r: coeficiente de determinação; d: coeficiente de concordância; c: coeficiente de desempenho.

Para Medeiros (2008), o método de EToJH obteve o pior índice de desempenho entre todos os métodos utilizados, justificando que a equação do mesmo é utilizada para áreas irrigadas de regiões áridas e semi-áridas, onde a necessidade hídrica de uma planta é grande e, também, pela simplicidade da equação, não permitindo obter uma grande faixa de condições climatológicas para ser utilizada.

Diante destes resultados, pode-se notar a melhora do método de EToHA com o aumento da escala de dias para 15 dias, onde este foi de Sofrível nas médias diárias (Tabela 4), para Bom com as médias quinzenais (Tabela 5), além do método de EToHS que, na escala diária era classificado com Muito Bom, teve seu desempenho classificado como Ótimo na escala quinzenal. Em sentido contrário, o método de EToTU, que antes apresentava índice Bom na escala diária, foi para Mediano na quinzenal.

O método que mesmo ao longo do aumento da escala diária manteve-se constante foi o método de EToPT, com desempenho Ótimo (Tabelas 4 e 5).

Em trabalho realizado por Reis et al. (2007), no período da seca, encontrou-se índice de desempenho Péssimo, Mal e Mediano para o método Hargreaves-Samani na região Norte, Sul e Serrana do Estado de Espírito Santo. Nesse sentido, em pesquisa realizada no Norte Fluminense, RJ, Mendonça et al. (2003) tinham por objetivo comparar os valores de ETo e, verificaram que o método de Hargreaves-Samani, apesar de apresentar, para período de um dia, um valor de coeficiente de determinação considerado baixo (0,49), indicou coeficientes lineares bastante próximos do valor unitário, salientando que este método é simples e de fácil aplicação, por necessitar apenas de dados de temperatura máxima, temperatura mínima e da latitude local.

A maior inclinação das retas dos modelos lineares que demonstram a correlação do método padrão com os empíricos foi encontrado com o modelo de EToTU com coeficiente angular de 1,596 e r² de 0,934 (Figura 2). No entanto, esses valores, apesar de serem altos, não predizem um bom resultado do conjunto do método, que deve ser interpretado conforme o índice de concordância (d), que expressa uma medida de exatidão do método; o coeficiente de

correlação (r), que expressa uma medida da precisão do método; e o índice “c”, que expressa um desempenho conjunto do método (Camargo & Sentelhas, 1997).

Pereira et al. (2009) destacaram que, na região da Serra da Mantiqueira, os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que empregam radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar.

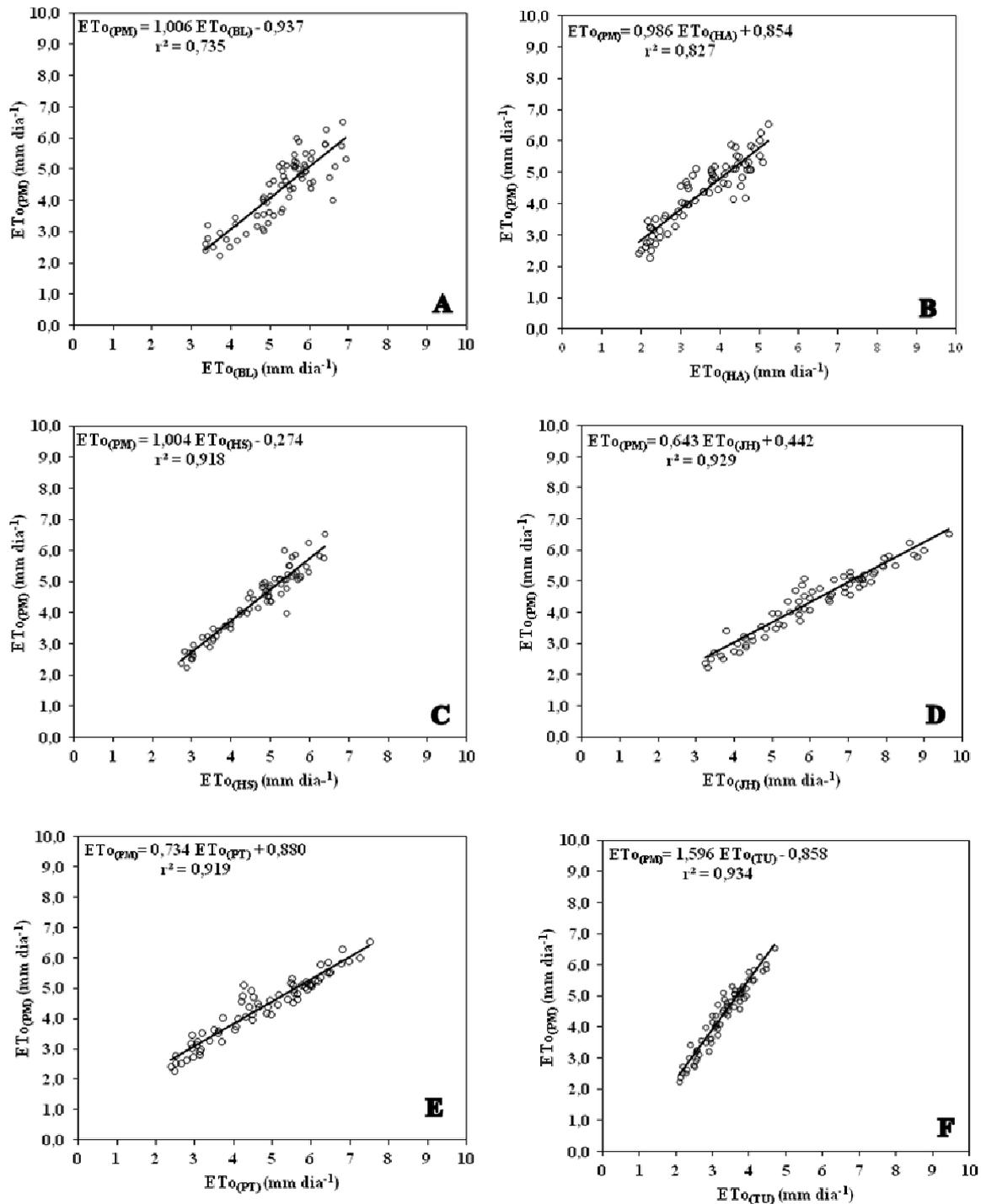


Figura 2. Regressão linear entre os valores quinzenais de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados pela comparação dos métodos de Benevides-Lopes (A), Hamon

(B), Hargreaves-Samani (C), Jensen-Haise (D), Priestley & Taylor (E) e Turc (F), com o método padrão, Penman-Monteith, entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

De acordo com a estimativa mensal, os métodos que apresentaram melhores desempenhos foram os de EToHS e EToPT, com valores do índice “c” 0,94 e 0,90, respectivamente, classificados, assim, como Ótimo (Tabela 6). Logo após, os métodos de EToHA, EToBL, EToJH e EToTU foram classificados como Muito bom (0,77); Mediano (0,65); Mediano (0,61); e Sofrível (0,60), respectivamente.

Tabela 6. Desempenho dos métodos de estimativa da ETo mensal entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

| Métodos | EEP (mm dia ⁻¹) | r | d | c | Desempenho |
|---------|-----------------------------|------|-------|------|------------|
| BL | 1,020 | 0,88 | 0,734 | 0,65 | Mediano |
| HA | 0,879 | 0,94 | 0,820 | 0,77 | Muito Bom |
| HS | 0,350 | 0,97 | 0,968 | 0,94 | Ótimo |
| JH | 1,821 | 0,97 | 0,632 | 0,61 | Mediano |
| PT | 0,590 | 0,96 | 0,936 | 0,90 | Ótimo |
| TU | 1,178 | 0,97 | 0,623 | 0,60 | Sofrível |

BL: método de Benevides-Lopes; HA: método de Hamon; HS: método de Hargreaves-Samani; JH: método de Jensen-Haise; PT: método de Priestley & Taylor; TU: método de Turc;; EEP: estimativa do erro padrão; r: coeficiente de determinação; d: coeficiente de concordância; c: coeficiente de desempenho.

Souza et al. (2011) observaram que o desempenho da estimativa mensal do método de Hargreaves-Samani apresentou-se superior aos outros métodos, semelhante ao resultado deste trabalho. Os outros métodos apresentaram desempenho inferior, pois, segundo eles, estes foram desenvolvidos em regiões climáticas distintas e não se ajustando às condições do clima da Amazônia Sul-Occidental, município de Cruzeiro do Sul, AC, onde foi realizado o estudo.

Nas cidades de Cretéu, Jaguaruana, ambas no Ceará, os métodos de Turc, Jensen-Haise, Priestley & Taylor, Benevides-Lopes e Hamon apresentaram desempenho péssimo, não sendo recomendada a utilização desses (Araújo et al., 2010).

Ao comparar a Tabela 6 às Tabelas 4 e 5, nota-se que o método de EToPT esteve sempre com seu desempenho Ótimo, sendo este, juntos com o método de EToHS, os métodos de melhor desempenho para a estimativa da ETo para o município de Aquidauana, MS, sendo importante ressaltar que o método EToHS utiliza somente dados de temperatura (máxima e mínima) e latitude local (que possui relação com a radiação extraterrestre, que varia em função dos dias), podendo ser facilmente utilizado por qualquer produtor que não disponibilize de dados de radiação solar e líquida nesta região.

Observou-se aumento progressivo dos coeficientes de determinação com o aumento do período de observação (Figuras 1 e 3), sendo que o r^2 dos modelos de EToBL, EToHA e EToHS passou de 0,582; 0,570 e 0,722 para 0,780; 0,875 e 0,941, respectivamente. Em trabalho realizado por Mendonça et al. (2003), avaliando vários modelos, observou-se que o método de Hargreaves-Samani obteve r^2 que passou de 0,49 (período diário) para 0,79 (período decenal).

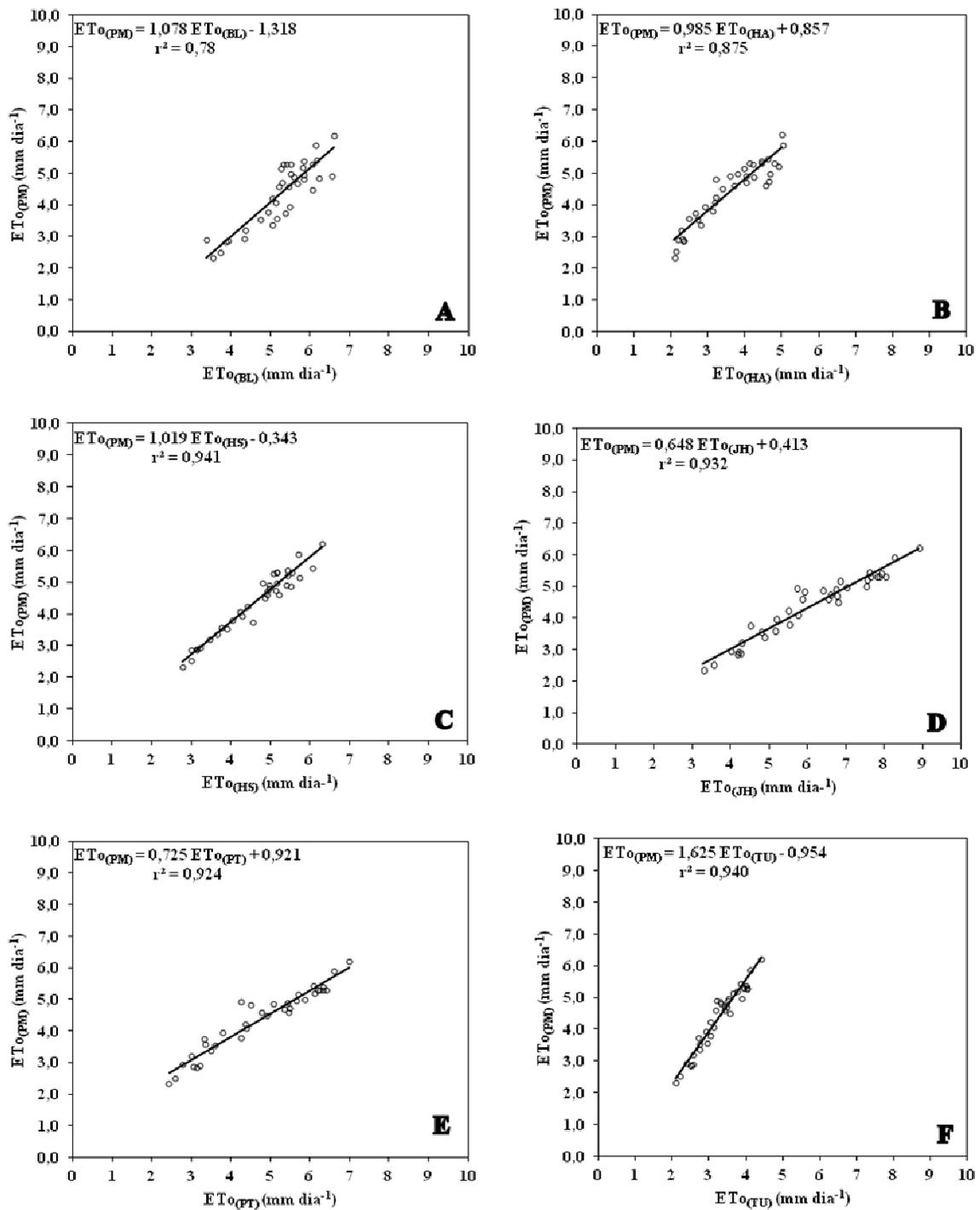


Figura 3. Regressão linear entre os valores mensais de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados pela comparação dos métodos de Benevides-Lopes (A), Hamon (B), Hargreaves-Samani (C), Jensen-Haise (D), Priestley & Taylor (E) e Turc (F), com o método padrão, Penman-Monteith, entre os anos de 2008 a 2010 em Aquidauana, MS.

6 CONCLUSÕES

O método de Priestley & Taylor possui melhor desempenho para a estimativa da ETo para períodos diários, quinzenais e mensais em Aquidauana, MS.

No período quinzenal, o método de Hargreaves-Samani obtém desempenho superior aos demais métodos. Na região de Aquidauana, MS, esse método é de grande utilidade para produtores rurais que não possuem dados de radiação solar.

Outros métodos que podem ser utilizados são o método de Hamon para períodos quinzenais e mensais; e os métodos de Turc e Jensen-Haise para estimativas diárias de ETo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 300 p. 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

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

ARAÚJO, E.M.; OLIVEIRA, J.B.; ARAÚJO, E.M.; LEDO, E.R.F.; SILVA, M.G. Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Penman-Monteith Fao-56, em cidades do estado do Ceará. **Revista ACTA Tecnológica**, Iguatu, v. 5, n. 2, 18p. 2010.

BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

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.

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.

BENAVIDES, J.G.; LOPEZ DIAZ, J. Formula para el calculo de La evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

GONÇALVES, F.M.; FEITOSA, H.O.; CARVALHO, C.M.; GOMES FILHO, R.R.; VALNIR JÚNIOR, M. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n.2, p.71–77, 2009.

GRASSI, M.T. As águas do planeta Terra. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**. Ed. Especial. Campinas. p. 31 – 40. 2001.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, 2001.

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

MEDEIROS, P.V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith**. São Carlos, 2008. 241p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

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

PEREIRA, D.R.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p. 2488-2493, 2009.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux on evaporation using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Washington, v.100, p. 81-92, 1972.

REIS, E.F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G.O.; PEZZOPANE, J.E.M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Estado do Espírito Santo no período seco. **Ideisa**, Árica, v. 25, n. 3, p. 75-84, 2007.

SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; DA SILVA, C.R.; CAMARGO, R.; TEODORO R.E.F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária

em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

SOUZA, L.P.; FARIAS, O.S.; MOREIRA, J.G.V.; GOMES, F.A.; FRADE JÚNIOR, E.F. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Cruzeiro do Sul – Acre. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia, v.7, n.12, p. 1-8, 2011.

WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.