

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA PARA MOSSORÓ (RN, BRASIL)¹

JOEL MEDEIROS BEZERRA^{2*}, GEBER BARBOSA DE ALBUQUERQUE MOURA³, ÊNIO FARIAS FRANÇA E SILVA², PABRÍCIO MARCOS OLIVEIRA LOPES³, BERNARDO BARBOSA DA SILVA⁴

RESUMO – Para aplicações de gestão da água, a estimação da evapotranspiração é um termo crítico no balanço hídrico, para estabelecimento de um desenvolvimento sustentável das atividades que demandam tal recurso. Desta forma se faz necessário estimar com maior precisão a evapotranspiração de referência (ET_o). O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos valores de ET_o diários obtidos por 12 métodos empíricos comparando-os com o método de Penman-Monteith FAO. Os dados meteorológicos utilizados para os modelos empíricos foram medidos em estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia, instalada na estação experimental Rafael Fernandes, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN. Mesmo com alguns métodos apresentando divergências em relação ao método padrão nos meses de maior demanda hídrica com erro absoluto da ordem 0,99 a 1,67, pôde-se inferir que os métodos mais indicados com base no índice de desempenho superior a 0,76, foram: Benevides e Lopez (1970), Linacre (1983), Bruin (1979), Jensen e Hayse (1963) e Priestley e Taylor (1972), nesta ordem, podendo assim representar de forma satisfatória a ET_o. Os métodos que necessitam de um número menor de elementos climáticos, tais como, Benevides-Lopez (c = 0,85) e Linacre (c = 0,79) apresentaram melhor desempenho do que os mais complexos, para estimativa da ET_o em períodos diários, em qualquer época do ano.

Palavras-chave: Agrometeorologia. Modelagem. Equações empíricas.

ESTIMATE OF REFERENCE DAILY EVAPOTRANSPIRATION TO MOSSORÓ (RN, BRAZIL)

ABSTRACT – For applications in water management, estimation of evapotranspiration is a critical term in the water balance, to establish a sustainable development of activities that requires such action. So it is necessary to more accurately estimate the reference evapotranspiration (ET_o). The objective of this study was to evaluate the performance of daily ET_o values obtained for 12 empirical methods by comparing them with the Penman-Monteith FAO. The meteorological data used for the empirical models were measured in the National Institute of Meteorology automatic meteorological station installed at the experimental station in Rafael Fernandes, Federal Rural University of Semi-Arid, Mossoró, RN. Even with some methods presenting divergences from the standard method in the months of the highest water demand with an absolute error of approximately 0.99 to 1.67, it could infer that the most suitable methods based on the performance index greater than 0.76 were: Benevides and Lopez (1970), Linacre (1983), Bruin (1979), Jensen and Hayse (1963) and Priestley and Taylor (1972), in that order, thus it may represent satisfactorily the ET_o. The methods that require fewer climatic elements such as Benevides and Lopez (c = 0.85) and Linacre (c = 0.79) performed better than more complex to estimate ET_o in daily periods at any time of year.

Keywords: Agrometeorology. Modeling. Empirical equations.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 06/03/2013; aceito em 09/07/2014.

Trabalho de dissertação de pós-graduação em engenharia agrícola na UFRPE do primeiro autor.

²Departamento de Tecnologia Rural, UFRPE, 52171-900, Recife-PE; joel_medeiros@oi.com.br, enio.silva@dtr.ufrpe.br.

³Departamento de Agronomia, UFRPE, 52171-900, Recife-PE; geber@depa.ufrpe.br; pabricaope@gmail.com.

⁴Departamento de Ciências Geográficas, UFPE, 50670-901, Recife-PE; bbdasilva.ufpe@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Segundo Souza et al. (2009), a ocorrência de períodos de longas estiagens na região semiárida brasileira, associada à alta disponibilidade de energia, favorece a redução do nível de água nos reservatórios, proporcionando déficit hídrico do solo, tornando a agricultura de sequeiro uma atividade de alto risco.

Para aplicações de gestão da água, a estimativa da evapotranspiração é um termo crítico no balanço hídrico, para estabelecimento de um desenvolvimento sustentável das atividades que demandam tal recurso. A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico. Dessa forma, a precisão de sua estimativa é importante para diversas aplicações e estudos, modelagem e, principalmente, no planejamento e manejo de cultivos agrícolas irrigados, além do gerenciamento de recursos hídricos (BACK, 2008; ALENCAR et al., 2011).

Existem diferentes técnicas de se estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), de acordo com Cavalcante Júnior et al. (2010), ela pode ser obtida a partir de medidas diretas em lisímetros ou estimada por meio de informações climáticas a partir de métodos teóricos e empíricos. Segundo Pereira et al. (1997), a medida direta da evapotranspiração é onerosa e difícil.

Diversos pesquisadores em todo o mundo propuseram modelos indiretos para a estimativa da ET_o, com as mais diferentes concepções e número de variáveis envolvidas (REIS et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2008; TAGLIAFERRE et al., 2010). Entretanto, vários elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis na propriedade ou região de interesse (BARROS et al., 2009). Por essa razão, os métodos para estimar ET_o que empregam um número menor de variáveis, além de serem mais simples, ainda são importantes para objetivos práticos (CONCEIÇÃO; MANDELLI, 2005).

A FAO recomenda que os métodos empíricos de estimativas da ET_o, sejam calibrados e validados para outras regiões, sendo a equação de Penman-Monteith a referência padrão para esses ajustes, por apresentar excelente correlação com a evapotranspiração medida em lisímetros (ALLEN et al., 1998; SMITH, 1991).

Antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da ET_o, é necessário saber quais os elementos climáticos disponíveis, qual o nível de precisão exigido e a finalidade. A partir daí, verifica-se quais 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).

Tagliaferre et al. (2012) ao avaliar o desempenho de algumas equações empíricas utilizadas para estimar a evapotranspiração de referência para as condições climáticas dos municípios de Anagé, Piatã e Ilhéus, do estado da Bahia, verificou que os melho-

res métodos foram Blaney-Cridle, Penman Modificado - FAO 24, Radiação FAO 24, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani. Sendo que os métodos mais complexos apresentaram melhor desempenho.

A ausência de dados climatológicos inviabiliza a aplicação da equação de Penman-Monteith FAO56, fazendo-se necessária a utilização de equações que exigem poucos parâmetros, para estimar a ET_o.

Para o estado do Rio Grande do Norte, a quantificação da evapotranspiração assume particular importância em virtude dos déficits hídricos que ocorrem ao longo do ano, constituindo uma limitação à produção agrícola e uma permanente fonte de risco na agricultura, principalmente em áreas cujas características climáticas são de semiáridas.

Diante do exposto, em virtude da importância de se estimar a ET_o, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de avaliar o desempenho de 12 métodos empíricos de determinação da ET_o diária em comparação com o método de Penman-Monteith FAO, considerado padrão, e apontar os que conjugam boa correlação com o padrão e que requeira o menor número de variáveis climáticas possível, para as condições climáticas de Mossoró (RN, Brasil).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos utilizados para a implementação dos modelos empíricos foram medidos na estação automática do INMET, localizada na estação experimental Rafael Fernandes, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), na localidade denominada comunidade "Alagoinha" (5° 03' 40" S, 37° 23' 51" W e altitude 72 m), Mossoró, estado do Rio Grande do Norte.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo BSw'h', caracterizado por ser muito quente e semiárido, com apenas duas estações climáticas bem definidas, sendo uma seca, que se prolonga quase sempre por sete a oito meses, e outra chuvosa que muito raramente ultrapassa cinco meses. A área apresenta precipitação média, em torno dos 677 mm ano⁻¹, a temperatura média do ar é de 27,4 °C.

Foram utilizados dados meteorológicos diários (pressão atmosférica, temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa máxima, mínima e média do ar, precipitação, radiação solar global e velocidade do vento), compreendidos entre janeiro de 2008 a dezembro de 2009.

A análise dos dados foi desenvolvida pela comparação de doze métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária: Hargreaves-Samani (HG-S 1985), Thornthwaite (TH 1948), Hamon (HM 1961), Jensen-Hayse (JH 1963), Priestley-Taylor (PT 1972), Linacre (LN 1977), Camargo (CM 1971), Camargo (CM 1983), Makkink (MK 1957), Makkink (MK 1987) e Bruin (BR 1979). Para fins de

avaliação do desempenho dos demais métodos considerou-se o método Penman-Monteith FAO 56 (PM 1998), adotado como padrão. Os métodos seguem descritos a seguir.

1 Método de Penman-Monteith (FAO56 1998)

Segundo as parametrizações propostas pelo Boletim 56 da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), a equação original de Penman-Monteith assume a seguinte forma para a ET₀ diária (mm d⁻¹):

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} \times U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \times U_2)} \quad (1)$$

em que: R_n - saldo de radiação à superfície (MJ m⁻²); G - fluxo de calor no solo (MJ m⁻²); T_a - temperatura média diária do ar (°C); U₂ - velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s - pressão de vapor de saturação (kPa), conforme Sadler e Evans (1989) e Pereira et al. (1997); e_a - pressão parcial de vapor (kPa); Δ - declividade da curva de depressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹); e γ - constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

As equações padronizadas para o cálculo de todos os parâmetros da Equação (1) são apresentadas em Allen et al. (1998).

2 Método de Hargreave-Samani (HG-S 1985)

Usando dados obtidos nos lisímetros de Davis, no estado da Califórnia (clima semiárido), com gramado, Hargreaves e Samani (1985) propuseram um novo método para a estimativa da evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997), considerado uma alternativa para situações em que não se tem dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, qual seja:

$$ET_0 = 0,0023 \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times (T_g + 17,8) \times R_a \quad (2)$$

em que: T_{max} - temperatura do ar máxima diária, °C; T_{min} - temperatura do ar mínima diária, °C; e R_a - radiação solar extraterrestre, mm d⁻¹.

3 Método de Makkink (MK 1957)

Correlaciona a evapotranspiração e radiação solar à superfície, conforme descrito por Pereira et al. (1997):

$$ET_0 = 0,61 \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times R_g - 0,12 \quad (3)$$

em que: R_g - radiação global incidente no nível da

superfície, expressa em equivalente de evaporação (mm d⁻¹).

4 Método de Priestley-Taylor (PT 1972)

Pode ser considerado método de balanço de energia com base apenas no termo radiativo (diabático) corrigido por um fator de ajuste que torna o método semelhante à razão de Bowen (PEREIRA et al., 1997) e cujas variáveis foram descritas acima:

$$ET_0 = \frac{1,26 \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times (R_n - G)}{\lambda} \quad (4)$$

5 Método de Camargo (CM 1971)

Este modelo foi desenvolvido analiticamente, baseando-se em resultados da evapotranspiração de referência para várias localidades:

$$ET_0 = 0,01 \times R_g \times T_g \times K \quad (5)$$

em que: K - fator de ajuste de Camargo: 1,00 para T_a até 23,5 °C; 1,05 para T_a de 23,6 a 24,5 °C; 1,10 para T_a de 24,6 a 25,5 °C; 1,15 para T_a de 25,6 a 26,5 °C; 1,20 para T_a de 26,6 a 27,5 °C e 1,30 para T_a superior a 27,5 °C.

6 Método de Thornthwaite (TW 1948)

Este método foi estabelecido por Thornthwaite (1948) que obteve excelente correlação com dados de localidades de área seca dos Estados Unidos e República Dominicana. O modelo é expresso segundo as equações:

$$ET_0 = ET' \frac{N}{1230} \quad (6)$$

$$ET' = 16 \times \left(\frac{10 \times I_a}{I} \right)^a \quad (7)$$

$$a = 67,5 \times 10^{-8} \times I^3 - 77,1 \times 10^{-6} \times I^2 + 0,0179 \times I + 0,49239 \quad (8)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (9)$$

$$i = \left(\frac{T_g}{5} \right)^{1,514} \quad (10)$$

em que: N - fotoperíodo, h; n - número de dias do mês abordado, d; a - expoente função do índice anual I; i - índice mensal de calor para o mês j; I - índice anual, que corresponde ao somatório dos 12 índices i mensais.

7 Método de Hamon (HM 1961)

O método foi desenvolvido por Hamon (1961), ao constatar que o método de Thornthwaite superestimava a evapotranspiração no verão e subestimava no inverno. O método inclui o efeito da inso-

lação, 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 expresso pela seguinte equação (PEREIRA et al., 1997):

$$ET_0 = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 + T_a}{160} \right) 25,4 \quad (11)$$

8 Método de Linacre (LN 1977)

Estabeleceu a seguinte fórmula empírica para estimar a evapotranspiração de referência, expressa em milímetros por dia, pressupondo albedo de 0,25:

$$ET_0 = \frac{\left[\frac{100(T_a + 0,605H)}{(100 - \phi)} + 1,9(T_a - T_d) \right]}{80 - T_a} \quad (12)$$

sendo: H – altitude, m; ϕ – latitude, graus; T_d – temperatura do ponto de orvalho, °C.

9 Método de Jensen-Hayse (JH 1963)

Determinado para regiões áridas e semiáridas, Jensen e Hayse (1963) apresentaram a seguinte equação de cálculo da evapotranspiração:

$$ET_0 = R_s(0,025T_a + 0,08) \quad (13)$$

em que T_a (°C) é a temperatura do ar média diária.

10 Método de Makkink Modificado (MK 1987)

De Bruin (1987) mostrou que a fórmula de Makkink pode também ser 'derivada' da fórmula empírica de Priestley e Taylor. Esta modificação gera a equação 14:

$$ET_0 = \frac{0,63 \frac{\Delta}{\lambda} R_s}{\lambda} \quad (14)$$

11 Método de Bruin (BR 1979)

A equação para a estimativa da evapotranspiração de referência diária com base na abordagem Bruin (DE BRUIN; KEIJMAN, 1979; ROSENBERY et al., 2004) é:

$$ET_0 = \left[\left(\frac{\Delta}{0,83\Delta + 0,63\gamma} \right) \times \left(\frac{R_n}{\lambda} \right) \right] \quad (15)$$

12 Método de Camargo (CM 1983)

Para simplificar a estimativa de evapotranspiração de referência, a partir do método de Thornthwaite, Camargo e Camargo (1983) propuseram a seguinte equação:

$$ET_0 = F \times R_a \times T_a \times ND \quad (16)$$

sendo: F – fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do ar do local: 0,01 para T_a de 23 °C; 0,0105 para T_a de 24 °C; 0,011 para T_a de 25 °C; 0,0115 para T_a de 26 °C e 0,012 para T_a de 27 °C. ND – Número de dias do período.

13 Método de Benevides e Lopez (BL 1970)

Na equação 17, verifica-se o método que foi desenvolvido por Benevides e Lopez (1970), baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar (PEREIRA et al., 1997):

$$ET_0 = 1,21 \times 10^{\left(\frac{7,851 T_a}{274,7 + T_a} \right)} \times (1 - 0,01UR) + 0,21T_a - 2,30 \quad (17)$$

Avaliação e comparação das equações

Para a análise comparativa entre o método padrão Penman-Montheith e os demais, foram utilizados os seguintes índices estatísticos de comparação sugeridos por Camargo e Sentelhas (1997): índice de precisão “r”, exatidão “d” (índice de Willmott) e de confiança ou desempenho “c”, e a estimativa do erro padrão do método (EEP).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentados as variações sazonais diárias dos elementos meteorológicos: radiação solar global incidente ($MJ m^{-2}$), velocidade do vento ($m s^{-1}$) a 2 m de altura, temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%), referente ao período de 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2009.

Percebe-se que nos períodos de 13 a 15/12/2008 e de 26/04/2009 a 18/05/2009, ocorreram problemas no sistema de coleta de dados, resultando em dados faltosos.

Nos dois anos estudados observou-se que o período seco (umidade relativa média < 70%, Figura 1B e precipitação mensal inferior ao valor médio anual, Figura 2) esteve compreendido entre os meses de julho a dezembro, enquanto o período úmido (umidade relativa média > 70% e precipitação mensal superior ao valor médio anual) de janeiro a junho, corroborando com os valores verificados por Cavalcante Junior et al. (2011), no município de Mossoró-RN, para o período de janeiro de 2002 a junho de 2008.

Observa-se que os métodos de Hargreaves-Samani (1985), Camargo (1971), Camargo (1983), Makkink modificado (1987), Thornthwaite (1948), Priestley e Taylor (1972), e Bruin (1979) apresentam distribuição sazonal similar no período de eventos de precipitação (fevereiro a julho), os mesmos subestimam os valores da ET_0 nos meses de agosto a janeiro, que correspondem ao período seco com elevadas

temperaturas do ar e incidência de elevadas parcelas de radiação solar global, além de altos valores de velocidade do vento e estiagem no regime pluviométrico, conforme Figuras 1 e 2.

Corroborando com os resultados apresentados por Cavalcante Junior et al. (2011), percebe-se que os métodos de Makkink (1957) e Hamon (1961) subestimaram os valores de ETo para condições climáti-

cas semiáridas.

Os métodos de Camargo (1971), Camargo e Camargo (1983) e Thornthwaite (1948) se aproximam do método padrão para os meses de março a junho. O método de Linacre (1977) subestima o método padrão em todos os meses. O método de Jensen e Hayse (1963) superestima o método padrão no período úmido ($UR > 70\%$).

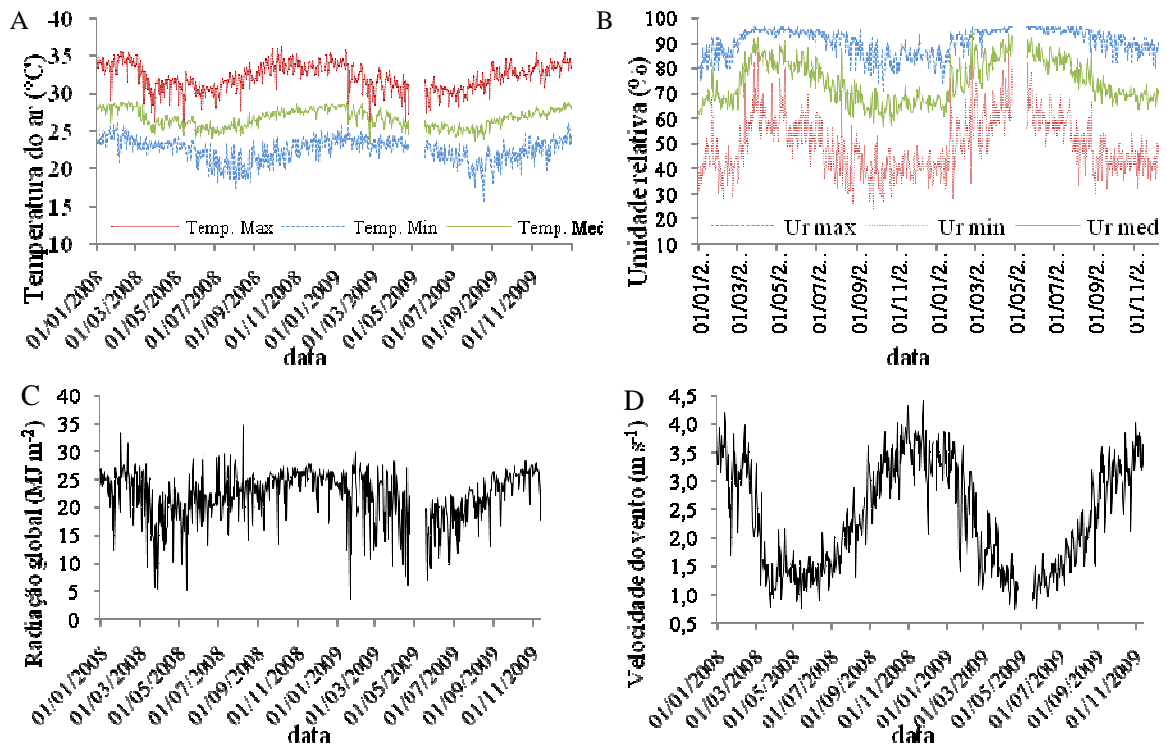


Figura 1. Variação sazonal diária dos elementos meteorológicos: A) temperatura do ar máxima, média e mínima ($^{\circ}\text{C}$); B) umidade relativa do ar máxima, média e mínima (%); C) radiação solar global incidente (MJ m^{-2}); e D) velocidade do vento (m s^{-1}) da área de estudo, de janeiro de 2008 a dezembro de 2009.

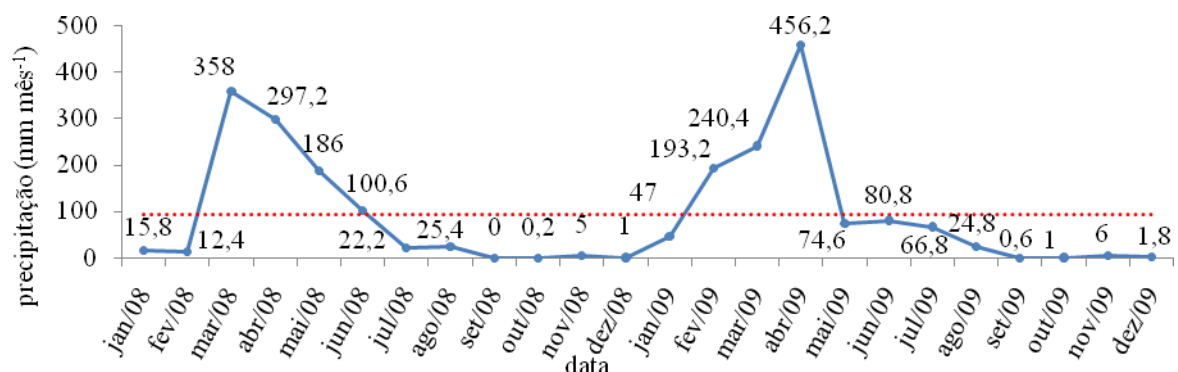


Figura 2. Variação sazonal mensal da precipitação da área de estudo, com a média do período, de janeiro de 2008 a dezembro de 2009.

Segundo Medeiros (2008), a equação de Jensen e Hayse (1963) foi desenvolvida para regiões áridas e semiáridas, o que explica sua boa adaptabilidade para o período seco, onde obteve ótimo desempenho, ao contrário do período úmido quando obteve apenas desempenho mediano, sendo satisfatório para regiões semi-áridas.

Os valores extremos apresentados na Figura 3 podem ser devido à presença de eventos discrepantes de precipitação pluviométrica, velocidade do vento e temperatura do ar, consequentemente da umidade relativa, provocando algumas incertezas na análise comparativa.

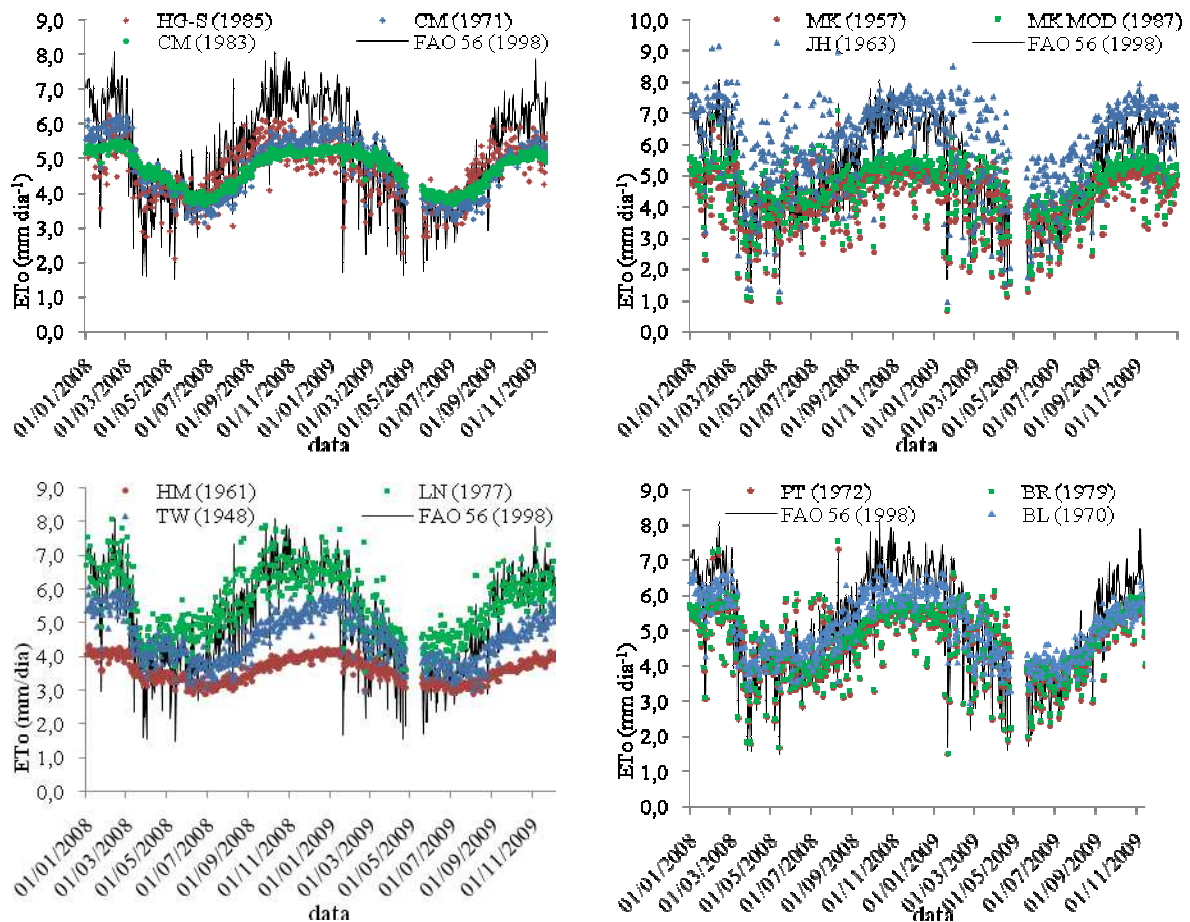


Figura 3. Variação diária da ETo estimada pelos métodos empíricos em estudo, para o período de 2008 a 2009.

Dessa forma, por meio dos dados de estimativa de ETo diários foram calculados alguns índices de avaliação e comparação de cada método avaliado com o método padrão (Figura 4). Pode-se observar que o método que apresentou melhor desempenho para escala diária foi o de Benevides e Lopez com valor do índice de desempenho “c” 0,85 classificado como ótimo, apresentando coeficiente de correlação “r” de 0,88, índice de desempenho de 0,91 e estimativa de erro padrão (EEP) de 0,69 mm dia⁻¹.

Na sequência, os métodos que apresentaram os índices de desempenho satisfatório foram LN 1977 com valor de desempenho de 0,83; BR 1979 e JH 1963 com valores de desempenho de 0,80 (muito bom); PT 1972 com 0,79 (muito bom), respectivamente, em seguida tem-se MK 1987, HG-S 1985 e MK 1957 na classe de desempenho bom. Os métodos CM 1971 e TW apresentaram, respectivamente, os seguintes valores de desempenho 0,63 e 0,61 (moderado). Enquanto os métodos CM 1983 e HA 1961 apresentaram respostas ruins às condições climáticas locais.

Os métodos que estima evapotranspiração de referência a partir da temperatura, com exceção dos métodos de HA 1961 e CM 1971, apresentaram desempenho de mediano a ótimo (vide, Tabela 1).

Entretanto, para Conceição (2003), os métodos

de estimativa de ETo que usam apenas a temperatura do ar como variável climática limitam a representatividade das condições climáticas para efeito de estimativas da evapotranspiração de referência porque conforme as condições de umidade e vento, a demanda hídrica atmosférica será diferente para os mesmos valores de temperatura do ar.

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).

Na Figura 4, observa-se o ajuste da linha tendência, tal como a função de cada método empírico em relação ao método padrão da FAO 56 para estimativa da ETo diária, e seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e coeficiente de exatidão (d).

Analisando a Figura 4, verifica-se que os métodos HG-S (1985), PT (1972), TW (1948), HM (1961), LN (1977), CM (1983), CM (1971) e BL (1970) superestimaram a ETo para valores inferiores a 3 mm d⁻¹ e subestimaram para valores maiores de 5 mm dia⁻¹.

Nos métodos BL (1970) e LN (1977) não ocorreram grandes dispersões dos dados ao redor da linha de tendência e os mesmos acompanharam a

reta de valores 1:1. Isso demonstra que os valores obtidos por esses métodos estão bem correlacionados com os do método de Penman-Monteith – FAO 56.

Tabela 1. Desempenho dos métodos de estimativa da ETo diária em comparação ao FAO 56, entre os anos de 2008 a 2009 em Mossoró, RN.

	HG-S (1985)	JH (1963)	PT (1972)	HM (1961)	LN (1977)	TW (1948)	CM (1971)	CM (1983)	MK (1957)	BR (1979)	MK (1987)	BL (1970)
EEP	1,00	1,02	0,88	1,94	0,77	1,11	1,02	1,18	1,21	0,84	0,99	0,69
r	0,87	0,91	0,91	0,81	0,92	0,81	0,80	0,76	0,87	0,91	0,87	0,94
R ²	0,75	0,82	0,83	0,66	0,85	0,66	0,63	0,58	0,76	0,82	0,76	0,88
d	0,80	0,88	0,86	0,56	0,89	0,75	0,79	0,64	0,78	0,88	0,84	0,91
EAM	0,82	0,87	0,69	1,67	0,60	0,93	0,84	0,99	0,97	0,66	0,79	0,58
REQM	1,00	1,02	0,88	1,94	0,77	1,11	1,02	1,18	1,21	0,84	0,99	0,69
c	0,69	0,80	0,79	0,45	0,83	0,61	0,63	0,48	0,68	0,80	0,73	0,85
class	B	MB	MB	R	MB	M	M	R	B	MB	B	ÓT

HG-S 1985 =Hargreaves e Samani 1985; JH 1963 = Jensen-Hayse 1963; PT 1972 = Priestley-Taylor 1972; HM 1961 =Hamon; LN 1977 = Linacre 1977; TW 1948 = Thornthwaite 1948; CM 1971 = Camargo 1971; CM 1983 = Camargo 1983; MK 1957 =Makkink 1957; BR 1979 =Bruin 1979; MK 1987 = Makkink 1987; BL 1970 = Benevides e Lopez 1970; EEP = Estimativa do Erro Padrão (mm dia⁻¹); r = coeficiente de correlação; R² = coeficiente de determinação; d = coeficiente de exatidão; EAM = Erro Absoluto Médio; REQM = Raiz do Erro Quadrático Médio; c = coeficiente de desempenho; class = classificação segundo Camargo e Sentelhas; B = Bom; MB = Muito Bom; R = Ruim; ÓT = Ótimo.

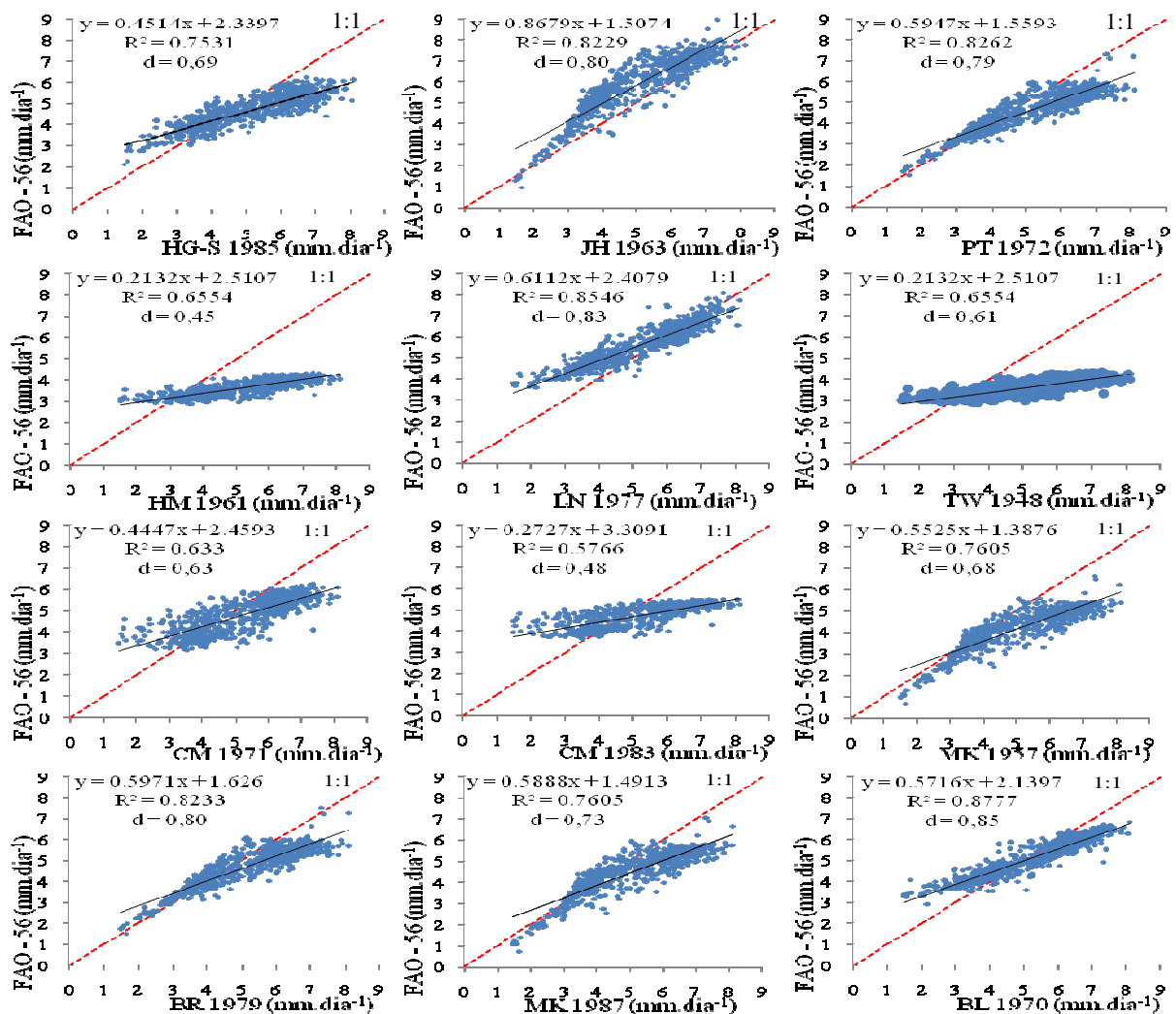


Figura 4. Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pela comparação dos métodos empíricos em estudo e o padrão, além do coeficiente de concordância.

Resultado contrário foi obtido para o método MK (1957), MK (1987), CM (1971), BR (1979), JH (1963) e HG-S (1985), que apresentaram maiores dispersão dos dados ao redor da linha de tendência.

Desta forma, observa-se que a evapotranspiração de referência para as condições climáticas da região semiárida sofre maior influência das variáveis mais simples de obtenção, temperatura do ar e umidade relativa, em relação às variáveis mais complexas de obtenção da parcela de energia incidente da radiação solar global.

Com estes resultados, pode-se inferir que os métodos indicados, para a região semiárida de Mossoró-RN, são os métodos de BL 1970, LN 1983, BR 1979, JH 1963 e PT 1972 por apresentarem os melhores índices de desempenho entre os métodos avaliados, sendo esses índices superiores a 0,76 (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Entre os métodos avaliados têm-se que o método de Benevides e Lopez é o mais recomendado na ausência do aparato de instrumentação de estação meteorológica, pois o mesmo apresenta a vantagem de ser simples e de fácil aplicação, por necessitar apenas de dados de temperatura e umidade relativa do ar.

Pode-se ainda ser utilizado o método de Linacre que apresentou bom desempenho, e demanda das variáveis de temperatura do ar, temperatura de orvalho, altitude e latitude. Enquanto os demais métodos que apresentaram bom desempenho necessitam de elementos meteorológicos de entrada da parcela de energia de radiação solar global ou mesmo balanço de radiação, portanto, à aplicação acaba sendo restringida para locais onde há carência de equipamentos para medi-los (SILVA et al., 2011).

Os resultados obtidos nesta pesquisa corroboraram a observação de Pereira et al. (1997) de que muitos métodos empíricos de estimativa de ETo, pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, não devem ser descartados, pois muitas vezes são os únicos com potencial de utilização, sendo que a sua aplicação fica limitada as condições climáticas em que foram desenvolvidos.

CONCLUSÕES

Os métodos que necessitam de um número menor de elementos climáticos, tais como, Benevides-Lopez e Linacre apresentaram melhor desempenho do que os mais complexos, para estimativa da ETo em períodos diários, em qualquer época do ano. Na região semiárida de Mossoró, RN, esses métodos são de grande utilidade para produtores rurais que não possuem dados de radiação solar global incidente. Uma vez que seus resultados apresentaram uma satisfatória correlação com o método padrão, Penman-Montheith FAO 56.

Diante das condições climáticas estudadas, de Mossoró, o método de Hamon se destaca como sen-

do o pior método para estimativa da ETo diária.

Outros métodos que podem ser utilizados para estimativa da ETo em escala diária para Mossoró, com resultados satisfatórios são: Bruin, Jensen-Haysee Prietley Taylor, mediante a presença de instrumentos de obtenção da parcela de energia de radiação solar global incidente.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P. et al. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 337-343, 2011.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (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. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

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

BARROS, V. R. et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BENEVIDES, J. G.; LOPEZ, D. Formula para El caculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: IAC, 1971. 24 p. (Boletim, n. 116).

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Teste de uma equação simples da evapo(transpi)ração potencial baseado na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, 1983, **Anais...** Campinas: SBAGRO, 1983, p. 229-244.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São

- Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1. p. 89-97, 1997.
- CAVALCANTE JUNIOR, E. G. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 1699-1708, 2011. (Suplemento 1).
- CAVALCANTE JÚNIOR, E. G. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró – RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 31, n. 2, p. 87-92, 2010.
- 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.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência 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.
- DE BRUIN, H. A. R.; From Penman to Makkink, in J. C. Hooghart (Ed.), *Evaporation and Weather, (technical Meeting of the Committee for Hydrological Research*, February, 1981), Comm. Hydrol. Res. TNO, Den-Haag, Proc. And Inform., v. 39, p. 5-30, 1987.
- DE BRUIN, H. A. R.; KEIJMAN, J. Q. Priestley-Taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. **Journal of Applied Meteorology**, Washington, v. 18, p. 898-903, 1979.
- GONÇALVES, F. M. et al. 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.
- HAMON, W. R. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Hydraulics Division ASCE**, New York, v. 87, n. 3, p. 107-120, 1961.
- HARGREAVES, G. L.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature basin. **Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE**, New York, v. 111, n. 1, p. 113-124, 1985.
- JENSEN, M. E.; HAYSE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation and Drain Engineering**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 89, p. 15-41, 1963.
- MAKKINK, G. F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, London, v. 11, n. 3, p. 277-288, 1957.
- MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de nove equações empíricas-teóricas com base na equação de Penman-Monteith**. 2008. 241 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- OLIVEIRA, L. M. M. et al. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- REIS, E. F. et al. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, Chile, v. 25, n. 3, p. 75-84, 2007.
- ROSENBERRY, D. O. et al. **Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, Cottonwood Lake Area, North Dakota, USA**. *Wetlands*, v. 24, p. 483-497, 2004.
- SADLER, E. J.; EVANS, D. E. Vapor pressure deficit calculations and their effect on the equation combination equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 49, n. 1, p.55-80, 1989.
- SILVA, V.J. et al. 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.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome FAO. 45 p. 1991.
- SOUZA, M. S. M. et al. Evapotranspiração do Maracujá nas condições do Vale do Curu. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 2, p. 11-16, 2009.
- TAGLIAFERRE, C. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 136-143, 2012.
- TAGLIAFERRE, C. et al. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Re-**

vista Caatinga, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.