



ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR PENMAN-MONTEITH FAO 56 USANDO DADOS METEOROLÓGICOS LIMITADOS EM ARACAJU, SERGIPE

Mairton Gomes da Silva¹, Lucas dos Santos Batista², Raimundo Rodrigues Gomes Filho³, Clayton Moura de Carvalho⁴

RESUMO

O método de Penman-Monteith (PM-FAO 56) é recomendado como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0). Porém, este método requer um grande número de dados de entrada como radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa, o que tem limitado sua aplicação em muitos locais. Baseado nisto, com o presente trabalho objetivou-se avaliar a estimativa da ET_0 PM-FAO 56 com dados meteorológicos limitados em Aracaju no Estado de Sergipe, Brasil. O trabalho foi realizado a partir de dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação. Foram avaliados três cenários de estimativa de ET_0 PM-FAO 56 com dados limitados: ausência de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento; ausência de radiação solar e velocidade do vento; e ausência de umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os valores de ET_0 estimados por PM-FAO 56 com dados completos e dados ausentes foram comparados considerando o coeficiente de determinação (R^2), erro médio de estimativa (MBE) e a raiz do erro do quadrático médio (RMSE). As melhores estimativas de ET_0 PM-FAO 56 foram quando a radiação solar estava disponível, com dados ausentes de umidade relativa do ar (estimada a partir da temperatura mínima) e valores constantes de velocidade do vento entre 1 e 3 $m\ s^{-1}$, porém quando apenas dados de temperaturas máxima e mínima do ar estão disponíveis não é recomendado estimar a ET_0 PM-FAO 56 nas condições climáticas locais.

Palavras-chave: Temperatura do ar, radiação solar global, velocidade do vento.

ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY FAO-56 PENMAN-MONTEITH USING LIMITED WEATHER DATA IN ARACAJU, SERGIPE, BRAZIL

¹Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Doutorando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, e-mail: mairtong@hotmail.com

²Eng. Agrônomo, Mestrando em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Sergipe, Brasil, e-mail: lucasbaptistaufbr@gmail.com

³Eng. Agrônomo, Professor adjunto do curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Sergipe, e-mail: rrgomesfilho@hotmail.com

⁴Tecnólogo em Recursos Hídricos e Irrigação, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, e-mail: carvalho_cmc@yahoo.com.br

ABSTRACT

The method Penman-Monteith (FAO-56 PM) is recommended as standard for estimation of reference evapotranspiration (ET_0). However, this method requires a large number of input data such as solar radiation, air temperature, relative humidity and wind speed, which has limited its use in many locations. Based on this, the objective of this work was to evaluate the estimation of ET_0 FAO-56 PM using limited weather data in Aracaju, Sergipe State, Brazil. The study was conducted from daily data of maximum and minimum air temperatures, relative humidity, wind speed and sunshine. Were evaluated three scenarios for estimation ET_0 FAO-56 PM with limited data: absence of solar radiation, relative humidity and wind speed; absence of solar radiation and wind speed and absence of relative humidity and wind speed. The values of ET_0 estimated by FAO-56 PM with complete data and missing data were compared considered the coefficient of determination (R^2), MBE (mean bias error) and RMSE (root mean square error). The best estimates of ET_0 FAO-56 PM was when solar radiation was available, with missing data of relative humidity (estimated from the minimum temperature) and constant values of wind speed between 1 and 3 $m\ s^{-1}$, however only when air temperatures are available is not recommended for estimation ET_0 FAO PM on local weather conditions.

Keywords: Air temperature, solar radiation, wind speed.

INTRODUÇÃO

Em regiões semiáridas onde os recursos hídricos são limitados e seriamente ameaçados pela exploração excessiva, é essencial estimar as necessidades hídricas das culturas com maior precisão, exigindo que o planejamento e a gestão da sua utilização ocorram em termos racionais e otimizados (JABLON; SAHLI, 2008; SILVA et al., 2015).

Segundo Sentelhas et al. (2010), a evapotranspiração é um parâmetro importante para os estudos climatológicos e hidrológicos, bem como para o planejamento e manejo de irrigação. A evapotranspiração de referência (ET_0) expressa a demanda evaporativa da atmosfera independente do tipo de cultura, desenvolvimento da cultura e práticas de manejo. Sendo as variáveis meteorológicas os fatores que mais afetam a ET_0 . Consequentemente, ET_0 é um parâmetro climático e pode ser calculado a partir de dados meteorológicos. Existem vários métodos para estimar a ET_0 , mas suas performances em diferentes condições climáticas podem variar, uma vez que eles têm algum empirismo em sua concepção.

Buscando uma padronização nas estimativas de ET_0 , a Organização das Nações

Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) em seu boletim 56 adotou como padrão o método de Penman-Monteith (PM-FAO 56) (ALLEN et al., 1998).

A principal complicação na estimativa de ET_0 usando esse modelo é a exigência de dados meteorológicos que podem não ser facilmente disponíveis, restringindo seu uso em vários locais (MOHAWESH, 2011). Nesse sentido, para solucionar tal problema, a FAO recomenda estimar a ET_0 a partir da importação de dados de uma estação que está sob as mesmas condições climáticas ou a partir de dados de temperatura máxima e mínima do ar (ALLEN et al., 1998). Neste último procedimento, a radiação solar é estimada com dados de temperatura máxima e mínima, a umidade relativa obtida em função da pressão parcial de vapor d'água (estimada a partir da temperatura mínima) e recomenda-se utilizar o valor médio de velocidade do vento de 2 $m\ s^{-1}$.

Tais procedimentos têm exigido sua avaliação em diferentes países e climas para testar sua viabilidade, como feito na Sérvia (TRAJKOVIC, 2005; TRAJKOVIC; KOLAKOVIC, 2009; TRAJKOVIC et al., 2011); no sul da Bulgária (POPOVA et al.,

2006); na Tunísia (JABLOUN; SAHLI, 2008); e Austral (WANG et al., 2011); na Turquia (BENLI et al., 2010); nos Estados Unidos da América (GOCIC; TRAJKOVIC, 2010; MARTINEZ; THEPADIA, 2010; ROJAS; SHEFFIELD, 2013); no sul de Ontário no Canadá (SENTELHAS et al., 2010); no Irã (MAJIDI et al., 2015); em países do Mediterrâneo (LÓPEZ-MORENO et al., 2009) e no Equador (CÓRDOVA et al., 2015).

No Brasil este procedimento já foi realizado em diferentes regiões, no Nordeste (SILVA et al., 2010a; SILVA et al., 2010b; ROCHA et al., 2011; SILVA et al., 2013; MORAIS et al., 2015); no Sudeste (CARVALHO et al., 2013; CARVALHO et al., 2015; ALENCAR et al., 2015) e no Sul (MINUZZI et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) a partir de dados meteorológicos limitados, em Aracaju no Estado de Sergipe, Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado a partir de dados médios diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação, oriundos da estação meteorológica convencional de Aracaju, Sergipe (10,95° Sul, 37,04° Oeste e altitude de 4,72 m acima do nível mar), compreendendo o período de 2000 a 2015. Os dados foram obtidos junto à rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada pelo método padrão Penman-Monteith com dados completos e mínimos (Equação 1), com auxílio de planilhas eletrônicas. Os procedimentos de estimativa dos parâmetros para cálculo da ET_o contando apenas com dados de temperatura máxima e mínima do ar segue a metodologia sugerida pelo boletim número 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

$$ET_{oPM} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

em que: ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith, em $mm \text{ dia}^{-1}$; R_n é a radiação líquida total, em $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; G é a densidade do fluxo de calor no solo, em $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; $T_{méd}$ é a temperatura média diária do ar, em $^{\circ}C$; u_2 é velocidade do vento média diária a 2 m de altura, em $m \text{ s}^{-1}$; e_s é a pressão de saturação de vapor, em kPa; e_a é a pressão parcial de vapor, em kPa; $e_s - e_a$ é o déficit de saturação de vapor, em kPa; Δ é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto de $T_{méd}$, em $kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$; γ é o coeficiente psicrométrico, em $kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$.

Foram avaliados três cenários para estimativa de ET_o PM-FAO 56 com dados meteorológicos em falta: dados ausentes de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (u_2); dados ausentes de

radiação solar e velocidade do vento; e dados ausentes de umidade relativa do ar e velocidade do vento. Para os cenários com dados de u_2 em falta, assumiram-se cinco cenários diferentes, cada um representado por um valor constante de u_2 , quais sejam: 1, 2, 3, 4 e 5 $m \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

A estimativa da radiação solar global foi baseada na diferença entre as temperaturas máxima e mínima do ar e o fator associado à posição do local da estação (Equação 2).

$$R_s = K_{rs} \sqrt{(T_{máx} - T_{mín})} \cdot R_a \quad (2)$$

em que: R_s e R_a são a radiação solar e no topo da atmosfera, respectivamente, em $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; $T_{máx}$ e $T_{mín}$ são as temperaturas máxima e mínima do ar, em $^{\circ}C$; K_{rs} é o coeficiente de

ajuste, adimensional. O K_{rs} é empírico e difere para regiões do interior e litoral: para o interior, onde a massa de terra domina e as massas de ar não são influenciadas por uma grande massa de água, K_{rs} é de 0,16; para locais situados no litoral ou adjacente à costa de uma massa de terra grande e onde as massas de ar são

influenciadas por um corpo de água, K_{rs} é de 0,19 (ALLEN et al., 1998). O valor de K_{rs} utilizado no presente trabalho foi de 0,19.

A radiação solar no topo da atmosfera foi obtida conforme os procedimentos sugeridos por Allen et al. (1998) (Equações 3 a 6).

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} \cdot d_r (\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (3)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} \right) \quad (4)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (5)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} - 1,39 \right) \quad (6)$$

em que: G_{sc} é uma constante, $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; d_r é a distância relativa Terra-Sol; δ é a declinação solar, radianos; φ é a latitude local, radianos; ω_s é o ângulo de radiação no momento do por do sol, radianos; J é o dia Juliano.

O cálculo da umidade relativa do ar foi em função da pressão de saturação de vapor d'água (e_s) estimada com base nas temperaturas máxima e mínima do ar, e a pressão parcial de vapor d'água (e_a) obtida assumindo a temperatura mínima do ar. De acordo com Allen et al. (1998), a temperatura do ponto de orvalho (T_{po}) pode ser substituída pela temperatura mínima do ar (T_{\min}) ($T_{po} \approx T_{\min}$). Esta afirmação pressupõe implicitamente que, ao amanhecer, quando a temperatura está próxima da T_{\min} , o ar está praticamente saturado, isto é, a umidade relativa do ar é quase 100% (Equação 7).

$$e_a = 0,6108 \cdot \exp \left(\frac{17,27 \times T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right) \quad (7)$$

Para o cenário em que os dados ausentes foram umidade relativa do ar e velocidade do vento, a radiação solar global foi calculada em função do número de horas de insolação (ALLEN et al., 1998) (Equação 8).

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (8)$$

em que: a e b são coeficientes locais, $a = 0,25$ e $b = 0,50$; n é o número de horas de brilho solar do dia, em h; N é a duração máxima de brilho solar em um dia, em h (Equação 9).

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (9)$$

O desempenho da ET_o estimada por PM-FAO 56 com dados meteorológicos completos e em falta foi avaliado utilizando os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), erro médio de estimativa (MBE) (Equação 10) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 11).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_o PM_{\text{mínimo}} - ET_o PM_{\text{completo}}) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_o PM_{\text{mínimo}} - ET_o PM_{\text{completo}})^2} \quad (11)$$

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR PENMAN-MONTEITH FAO 56
USANDO DADOS METEOROLÓGICOS LIMITADOS EM ARACAJU, SERGIPE

em que: $ET_{oPM_{mínimo}}$ é a evapotranspiração de referência estimada por Penman-Monteith com dados mínimos, em $mm\ dia^{-1}$; $ET_{oPM_{completo}}$ é a evapotranspiração

de referência estimada por Penman-Monteith com dados completos, em $mm\ dia^{-1}$; n é o número de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 encontra-se a relação entre as estimativas da ET_o PM-FAO 56 com dados completos e mínimos, com a radiação solar global (R_s) estimada a partir das temperaturas máxima

e mínima do ar, umidade relativa (UR) obtida em função da pressão parcial de vapor estimada a partir da temperatura mínima do ar e valores constantes de velocidade do vento (u_2) de 1, 2, 3, 4 e 5 $m\ s^{-1}$, respectivamente.

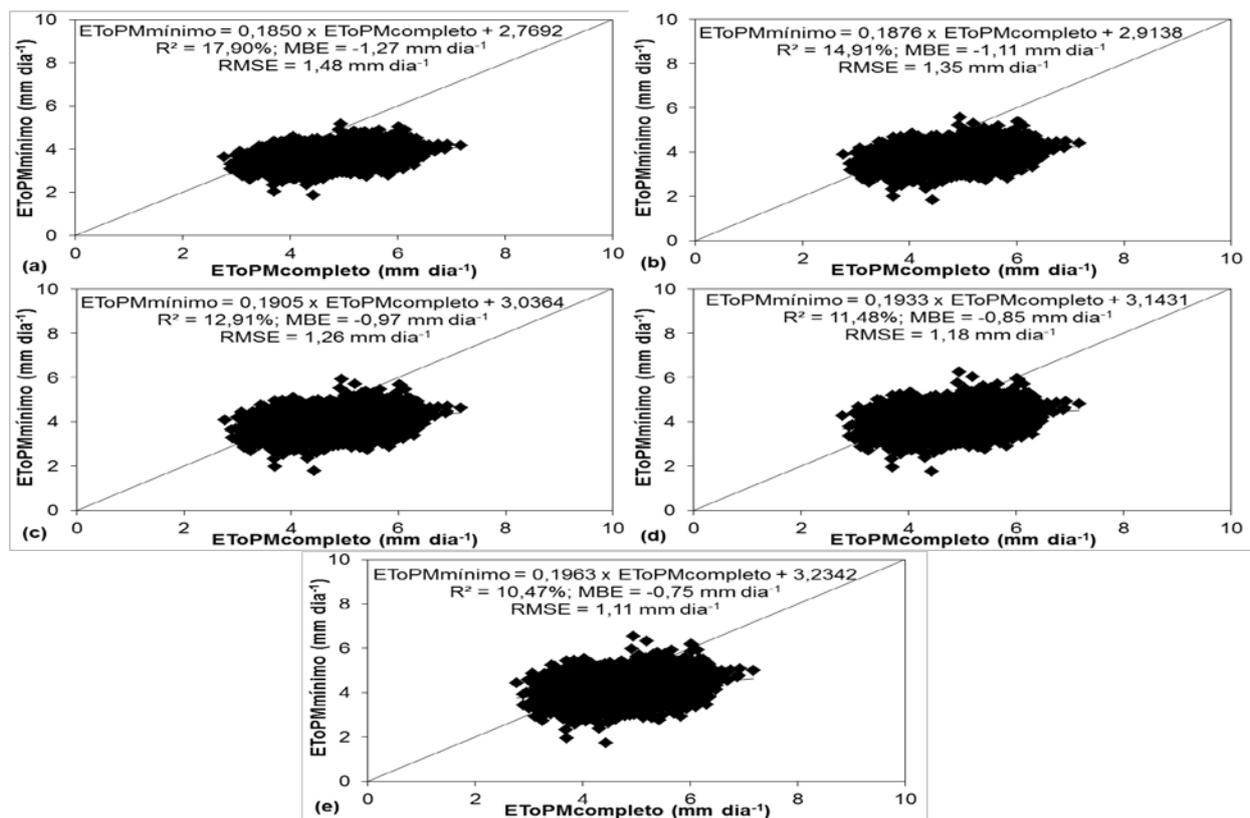


Figura 1. Comparação entre a ET_o PM-FAO 56 com dados completos e ET_o PM-FAO 56 com dados mínimos (radiação solar global e umidade relativa do ar estimadas a partir das temperaturas máxima e mínima do ar) e valores fixos de velocidade do vento de $1\ m\ s^{-1}$ (a), $2\ m\ s^{-1}$ (b), $3\ m\ s^{-1}$ (c), $4\ m\ s^{-1}$ (d) e $5\ m\ s^{-1}$ (e).

Observam-se baixos valores do coeficiente de determinação (R^2), sendo estes valores reduzidos ainda mais à medida que se aumentou a u_2 , variando de 17,90% (Figura 1a) quando foi utilizada a u_2 constante de $1\ m\ s^{-1}$ a 10,47% (Figura 1e) ao se utilizar a u_2 de $5\ m\ s^{-1}$.

Os baixos valores de R^2 refletem em maiores dispersões dos dados, como se pode verificar no indicador MBE, em que a ET_o PM-FAO 56 com dados mínimos tendeu a subestimar a ET_o PM-FAO 56 com dados completos. Estas subestimativas foram maiores quando se utilizou os menores

valores constantes de u_2 , com valores médios de MBE da ordem de -1,27; -1,11; -0,97; -0,85 e -0,75 mm dia^{-1} para os valores de u_2 de 1 m s^{-1} (Figura 1a), 2 m s^{-1} (Figura 1b), 3 m s^{-1} (Figura 1c), 4 m s^{-1} (Figura 1d) e 5 m s^{-1} (Figura 1e), respectivamente.

Ainda de acordo com os indicadores estatísticos apresentados na Figura 1, os valores de RMSE variaram de $1,11 \text{ mm dia}^{-1}$ ($u_2 = 5 \text{ m s}^{-1}$) a $1,48 \text{ mm dia}^{-1}$ ($u_2 = 1 \text{ m s}^{-1}$) e, segundo Sentelhas et al. (2010) valores de erros dessa magnitude são muito elevados para estimativas diárias de ET_0 . Isto implica que, nas condições climáticas de Aracaju, no Estado de Sergipe, o procedimento de estimar a radiação solar e umidade relativa do ar quando estão disponíveis apenas dados de temperaturas máxima e mínima do ar não é indicado para estimar a ET_0 PM-FAO 56, devendo o pesquisador e/ou técnico local recorrer a métodos que requeiram o menor número de variáveis de entrada, desde que, a escolha de tais métodos seja validada com o uso de lisímetro.

Os resultados encontrados no presente trabalho estão de acordo com relatos anteriores. De acordo com Benli et al. (2010), no clima semiárido de Ancara na Turquia é preferível quando se tem apenas dados de temperatura do ar utilizar métodos mais simples do que estimar a ET_0 PM-FAO quando dados de umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento estão em falta. Em diferentes localidades na Flórida, Martinez e Thepadia (2010) reportaram superestimativa da ET_0 PM-FAO com dados mínimos em relação as estimativas com dados completos. Em estudos realizados na Sérvia por Trajkovic (2005), Trajkovic e Kolakovic (2009) e Trajkovic et al. (2011) quando foi utilizado o valor de u_2 constante de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1998), os autores alertam que este valor deve ser usado com precaução, especialmente quando dados de radiação solar e/ou umidade relativa não estão disponíveis.

Corroborando com os resultados obtidos em trabalhos realizados na Sérvia, nas condições climáticas de clima semiúmido do Irã, de acordo com Majidi et al. (2015) é recomendável usar o valor de u_2 médio histórico de cada estação ou um valor médio de toda a área de estudo como uma alternativa para a falta de dados de u_2 . Em estudo de Popova et al. (2006) na Bulgária, quatro procedimentos foram utilizados quando os dados de u_2 não estavam disponíveis: importar dados de uma estação próxima; utilizar uma média anual regional para todas as estações ($1,68 \text{ m s}^{-1}$); utilizar uma média mensal regional e utilizar o valor fixo de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. De acordo com os autores, quando dados de u_2 não estão disponíveis, os melhores procedimentos para o cálculo da ET_0 PM-FAO com dados mínimos consistem em utilizar a u_2 média anual regional ou importar dados de estações próximas.

No Brasil, neste mesmo tipo de abordagem de estimativa da ET_0 PM-FAO apenas com dados de temperatura máxima e mínima do ar, Minuzzi et al. (2014) não recomendam tal procedimento para as condições climáticas de Santa Catarina, devendo-se recorrer a outros métodos de estimativa de ET_0 diária que necessitem apenas dessa variável. Elevados valores de RMSE foram encontrados por Alencar et al. (2015) em diferentes localidades do Estado de Minas Gerais e por Moraes et al. (2015) no Submédio Vale do São Francisco, quando a ET_0 PM-FAO foi estimada com dados mínimos, com a radiação solar estimada a partir das temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa com a temperatura mínima e u_2 de 2 m s^{-1} .

Diferentemente dos resultados reportados no presente trabalho, na Tunísia Jabloun e Sahli (2008) consideraram a u_2 média anual para cada local em estudo, radiação solar computada a partir das temperaturas máxima e mínima do ar e a pressão parcial de vapor a partir da temperatura mínima do ar; de acordo com os

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR PENMAN-MONTEITH FAO 56 USANDO DADOS METEOROLÓGICOS LIMITADOS EM ARACAJU, SERGIPE

resultados, especialmente para as localidades de Kairouan, Kef e Sidi-Bouزيد reportaram estimativas precisas de ET_0 PM-FAO com dados mínimos quando comparado com a ET_0 PM-FAO com dados completos, com valores de RMSE e MBE variando de 0,411 a 0,80 mm dia^{-1} e de -0,103 a 0,078 mm dia^{-1} , respectivamente.

No estudo de Wang et al. (2011) nas condições climáticas do Malawi, foram estimadas a radiação solar e umidade relativa do ar a partir das temperaturas máxima e mínima e utilizada a u_2 fixa de $2,0 \text{ m s}^{-1}$; pois de acordo com os resultados, em algumas localidades este procedimento foi adequado nas estimativas da ET_0 PM-FAO, já em outras localidades as estimativas de ET_0 foram imprecisas. De acordo com Córdova et al. (2015), ao utilizarem a média global de u_2 de $2,0 \text{ m s}^{-1}$, os autores verificaram bons resultados, sugerindo que os cálculos de ET_0 podem não ser muito sensíveis à u_2 em climas úmidos frios como nos Andes do Equador.

No Brasil, mais precisamente no Estado do Ceará, aplicando procedimento similar para estimativa da radiação solar global e umidade relativa do ar, Silva et al. (2010a) reportaram as melhores estimativas de ET_0 PM-FAO quando comparado a ET_0 PM-FAO com dados completos para as condições climáticas do município de Sobral, ao utilizarem os valores constantes de u_2 na faixa de $1,0$ a $3,0 \text{ m s}^{-1}$. Já na localidade de Campos Sales, Silva et al. (2010b) registraram as melhores estimativas de ET_0 PM-FAO com dados mínimos, especialmente na faixa de u_2 de $2,5$ a $5,0 \text{ m s}^{-1}$. Silva et al. (2013) registraram as melhores estimativas de ET_0 PM-FAO com dados mínimos, em Crateús, com u_2 de $1,5$ a $3,0 \text{ m s}^{-1}$; u_2 de $2,5$ a

$4,5 \text{ m s}^{-1}$ em Quixeramobim e u_2 de $1,5$ e $2,0 \text{ m s}^{-1}$ em Tauá.

Estes resultados reforçam os resultados dos estudos de Rocha et al. (2011) na Bacia do Jaguaribe no Estado do Ceará e de Carvalho et al. (2013) em Lavras, no Estado de Minas Gerais. De acordo com estes autores, a abordagem com dados mínimos é uma alternativa viável para a estimativa da ET_0 onde os dados de entrada necessários para PM-FAO 56 não estão disponíveis, consequentemente estimativas precisas de ET_0 associada ao coeficiente de cultivo da cultura, implicando em um manejo da irrigação mais eficiente e que segundo Silva et al. (2010a), pode evitar o desperdício de água e diminuir o custo com energia elétrica no momento da irrigação.

No desenvolvimento de um programa computacional para facilitar as estimativas de ET_0 PM-FAO 56 com dados limitados, Gocic e Trajkovic (2010) validaram o mesmo com dados de uma estação meteorológica de Davis na Califórnia, Estados Unidos, recomendando-se este tipo de abordagem para a estimativa da ET_0 PM-FAO quando não há dados disponíveis. Nas condições climáticas do nordeste da Península Ibérica, também se recomenda esse mesmo tipo de abordagem para estimativa da ET_0 com dados mínimos (LÓPEZ-MORENO et al., 2009).

Para o cenário de estimativas de ET_0 PM-FAO 56 em que os dados em falta foram radiação solar global e velocidade do vento, ou seja, a umidade relativa do ar estava disponível, verificou-se um aumento no coeficiente de determinação, variando de 27,97% quando foi utilizada a u_2 constante de 1 m s^{-1} (Figura 2a) a 36,99% ao se utilizar a u_2 de 4 m s^{-1} (Figura 2d), consequentemente ocorreu uma redução nos erros.

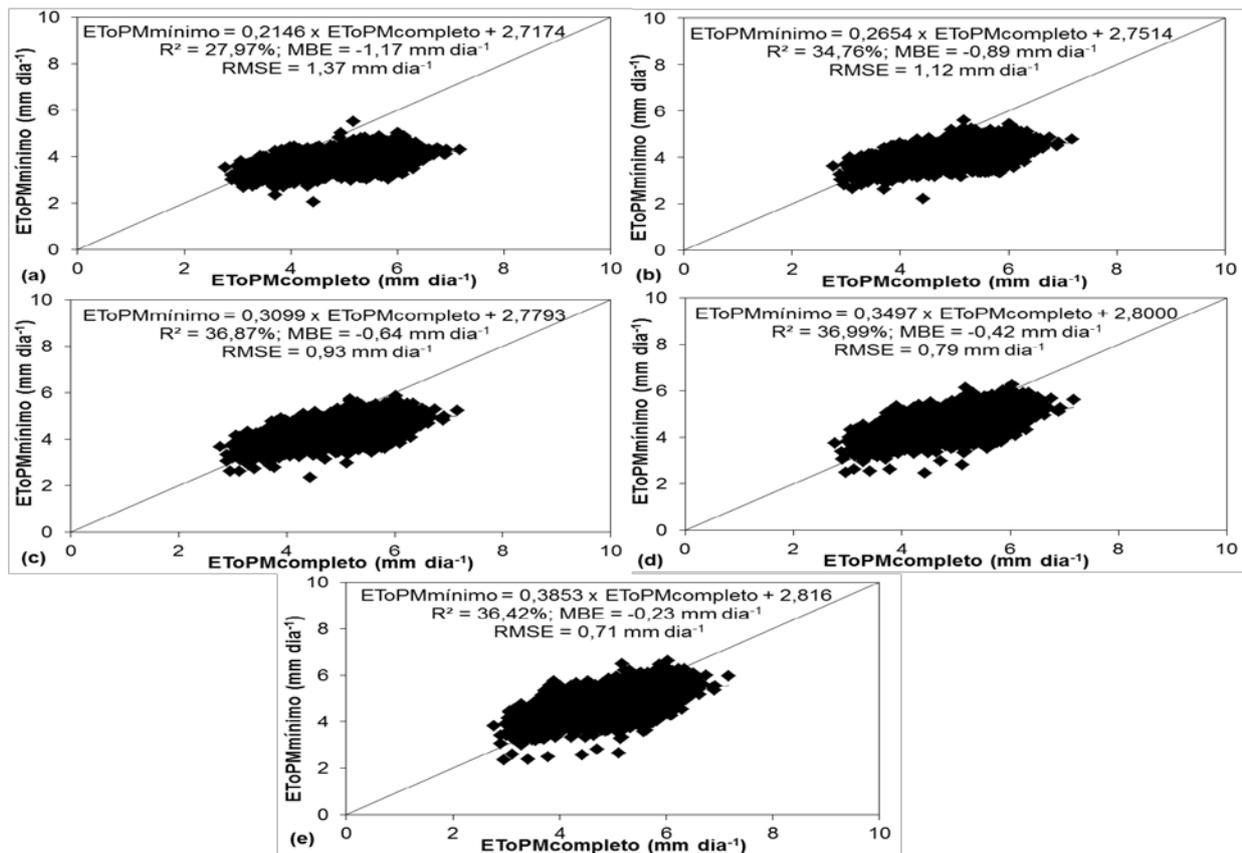


Figura 2. Comparação entre a ET₀ PM-FAO 56 com dados completos e ET₀ PM-FAO 56 com dados mínimos (radiação solar global estimada a partir das temperaturas máxima e mínima do ar) e valores fixos de velocidade do vento de 1 m s⁻¹ (a), 2 m s⁻¹ (b), 3 m s⁻¹ (c), 4 m s⁻¹ (d) e 5 m s⁻¹ (e).

Os valores de MBE e RMSE oscilaram de -1,17 a -0,23 mm dia⁻¹ e de 1,37 a 0,71 mm dia⁻¹ (u_2 de 1 a 5 m s⁻¹). Porém, com base nestes valores estatísticos encontrados para as condições climáticas de Aracaju, no Estado de Sergipe, mesmo quando a umidade relativa do ar estiver disponível não é recomendado estimar a ET₀ PM-FAO, assumindo a estimativa da radiação solar global a partir das temperaturas máxima e mínima do ar. Isto mostra que a radiação solar é o parâmetro de maior impacto sobre as estimativas de ET₀ PM-FAO 56 com dados mínimos em locais litorâneos. O que pode ser comprovado no estudo de Carvalho et al. (2015) na região

Sudeste do Brasil, é que segundo este autor o cálculo da ET₀ PM-FAO com estimativa da radiação solar a partir das temperaturas máxima e mínima do ar não deve ser utilizado nas regiões litorâneas.

No cenário em que a radiação solar (obtida em função da insolação) estava disponível, confirmando o que foi dito anteriormente, ou seja, as estimativas de ET₀ PM-FAO com dados de umidade relativa do ar obtida a partir da temperatura mínima do ar e valores constantes de velocidade do vento foram mais precisas quando comparado com ET₀ PM-FAO com dados completos (Figura 3).

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR PENMAN-MONTEITH FAO 56
USANDO DADOS METEOROLÓGICOS LIMITADOS EM ARACAJU, SERGIPE

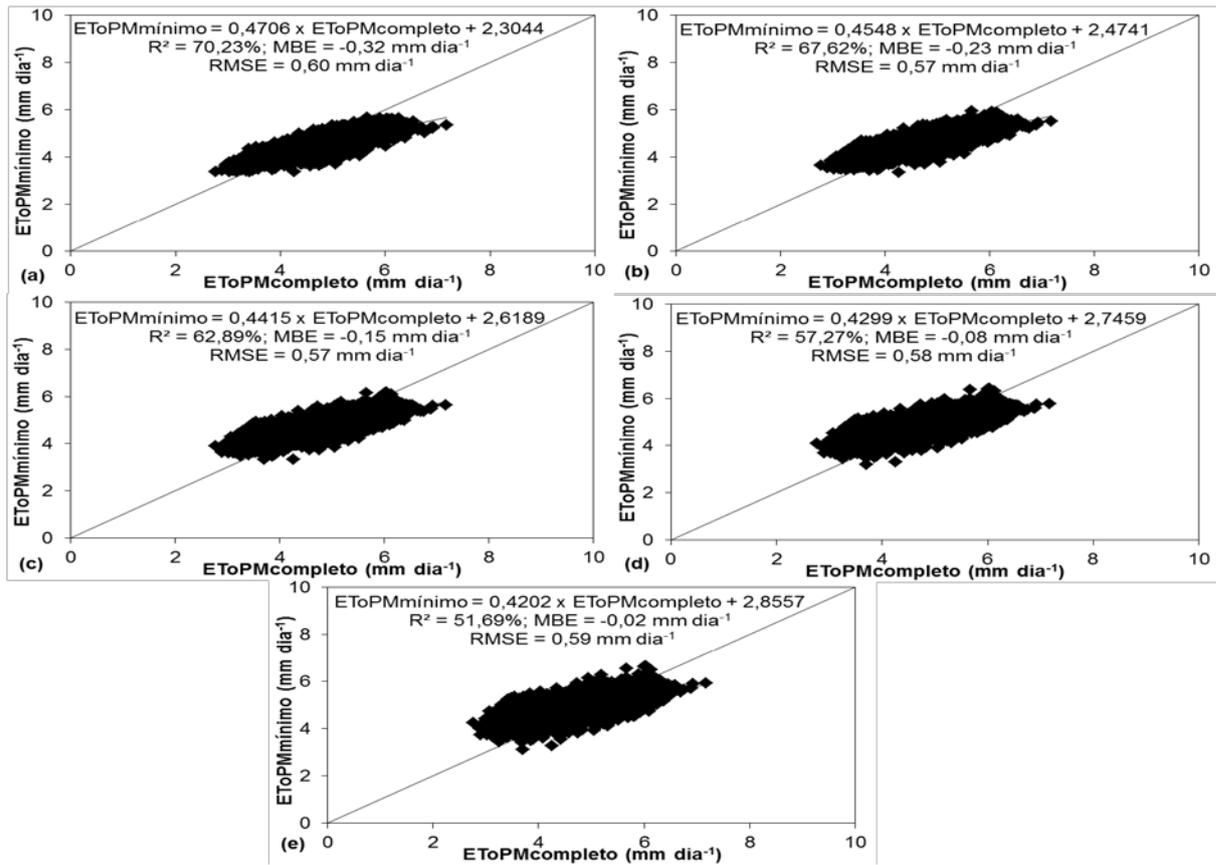


Figura 3. Comparação entre a ET_0 PM-FAO 56 com dados completos e ET_0 PM-FAO 56 com dados mínimos (umidade relativa do ar estimada a partir da temperatura mínima do ar) e valores fixos de velocidade do vento de 1 m s⁻¹ (a), 2 m s⁻¹ (b), 3 m s⁻¹ (c), 4 m s⁻¹ (d) e 5 m s⁻¹ (e).

Estes resultados corroboram com os apresentados por Sentelhas et al. (2010), pois os autores concluíram que no sul de Ontário no Canadá, o método FAO PM pode ser usado para estimar a ET_0 , razoavelmente, quando dados de velocidade do vento e/ou de umidade relativa não estiverem disponíveis. Ainda de acordo com os mesmos autores, quando utilizaram os procedimentos recomendados pelo boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) para substituir dados em falta de u_2 e e_a (a partir da temperatura mínima do ar) ocorreu pouco impacto negativo sobre as estimativas de ET_0 , mas quando utilizaram o método recomendado para substituir dados em falta de radiação solar (a partir das temperaturas máxima e mínima do ar) não houve um bom desempenho.

Para as condições climáticas locais, com base no coeficiente de determinação, especialmente quando se utiliza os valores

constantes de u_2 na faixa de 1 a 3 m s⁻¹, verifica-se melhor precisão nas estimativas de ET_0 PM-FAO 56; sendo os valores de RMSE da ordem de 0,60 mm dia⁻¹ (Figura 3a), 0,57 mm dia⁻¹ (Figura 3b) e 0,57 mm dia⁻¹ (Figura 3c). Em geral, os valores de MBE oscilaram de -0,32 mm dia⁻¹ ($u_2 = 1$ m s⁻¹) (Figura 3a) a -0,02 mm dia⁻¹ ($u_2 = 5$ m s⁻¹) (Figura 3e).

CONCLUSÕES

Para as condições climáticas da região em estudo, não se recomenda estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método padrão Penman-Monteith FAO 56 quando se tem disponível apenas dados de temperaturas máxima e mínima do ar. Devendo-se recorrer a outros métodos alternativos que necessitem apenas das temperaturas máxima e mínima do ar em sua

formulação, desde que, tais métodos sejam validados com o uso de lisímetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 297p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.35, n.1, p.39-50, 2015.

BENLI, B.; BRUGGEMAN, A.; OWEIS, T.; ÜSTÜN, H. Performance of Penman-Monteith FAO56 in a semiarid highland environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.136, n.11, p.757-765, 2010.

CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p.1-11, 2015.

CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; OLIVEIRA, K. M. G.; SILVA, B. M.; ALVES, M. C.; SÁ JÚNIOR, A.; MIRANDA, W. L. FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data. **Idesia**, Chile, v.31, n.3, p.39-47, 2013.

CÓRDOVA, M.; CARRILLO-ROJAS, G.; CRESPO, P.; WILCOX, B.; CÉLLERI, R. Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. **Mountain Research and Development**, Washington, v.35, n.3, p.230-239, 2015.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.71, n.2, p.158-162, 2010.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95, n.6, p.707-715, 2008.

LÓPEZ-MORENO, J. I.; HESS, T. M.; WHITE, S. M. Estimation of reference evapotranspiration in a mountainous Mediterranean site using the Penman-Monteith equation with limited meteorological data. **Pirineos**, Jaca, v.164, p.7-31, 2009.

MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; VAZIFEDOUST, M.; FARID, A.; AHMADI, T. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. **Water Resources Management**, Amsterdam, v.29, p.2107-2124, 2015.

MARTINEZ, C. J.; THEPADIA, M. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.136, n.7, p.494-501, 2010.

MINUZZI, R. B.; RIBEIRO, A. J.; SILVA, D. O.; KUNESKI, A. C. Estimativa da evapotranspiração de referência diária por Penman-Monteith FAO com dados de temperatura do ar para Santa Catarina. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.3, p.548-558, 2014.

MOHAWESH, O. E. Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. **Plant Soil Environment**, Prague, v.57, n.4, p.145-152, 2011.

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR PENMAN-MONTEITH FAO 56
USANDO DADOS METEOROLÓGICOS LIMITADOS EM ARACAJU, SERGIPE

- MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; DINIZ, W. J. S.; SOUZA, C. A. A. Avaliação do método de Penman Monteith FAO 56 com dados faltosos e de métodos alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.8, n.6, p.1644-1660, 2015.
- POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to south Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, Slough, v.55, n.2, p.201-215, 2006.
- ROCHA, E. J. T.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JÚNIOR, S. C. F.; GONDIM, R. S. Estimativa da Eto pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.1, p.75-83, 2011.
- ROJAS, J. P.; SHEFFIELD, R. E. Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith equation using limited weather data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.139, n.4, p.285-292, 2013.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, n.5, p.635-644, 2010.
- SILVA, I. N.; OLIVEIRA, J. B.; FONTES, L. O.; BRASIL, P. P.; SILVA, M. G. Estimativa da evapotranspiração de referência com dados mínimos para o cariri oeste cearense. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v.6, n.3, p.42-48, 2010b.
- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, J. B.; LÊDO, E. R. F.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, E. M. Estimativa da ETo pelos métodos Penman-Monteith FAO 56 e Hargreaves-Samani a partir de dados de Tx e Tn para Sobral e Tauá no Ceará. **Acta Tecnológica**, Codó, v.5, n.2, p.52-68, 2010a.
- SILVA, M. G.; ARRAES, F. D. D.; LEDO, E. R. F.; SANTOS, N. T.; SILVA FILHO, J. A. Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará. **Revista Agro@ambiente**, Boa Vista, v.7, n.3, p.284-293, 2013.
- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. S.; CARMO, F. F.; LEDO, E. R. F.; SILVA FILHO, J. A. Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves-Samani no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v.9, n.2, p.132-141, 2015.
- TRAJKOVIC, S. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.131, n.4, p.316-322, 2005.
- TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.135, n.4, p.443-449, 2009.
- TRAJKOVIC, S.; STOJNIC, V.; GOCIC, M. Minimum weather data requirements for estimating reference evapotranspiration. **Architecture and Civil Engineering**, Nis, v.9, n.2, p.335-345, 2011.
- WANG, Y. M.; NAMAONA, W.; GLADDEN, L. A.; TRAORE, S.; DENG, L. T. Comparative study on estimating reference evapotranspiration under limited climate data condition in Malawi. **International Journal of the Physical Sciences**, v.6, n.9, p.2239-2248, 2011.