



## Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará

### *Evaluation of reference evapotranspiration by Penman-Monteith using minimum climatic data in the backcountry of Ceará*

Mairton Gomes da Silva<sup>1\*</sup>, Francisco Dirceu Duarte Arraes<sup>2</sup>, Eder Ramon Feitoza Ledo<sup>3</sup>, Nara Tosta Santos<sup>4</sup>, José Ailton da Silva Filho<sup>5</sup>

**Resumo** - Nas regiões de clima semiárido os recursos hídricos são limitados e seriamente ameaçados pela excessiva exploração. Objetivou-se com este estudo avaliar o desempenho do método Penman-Monteith FAO 56 (PM-FAO 56) para estimar a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) com dados mínimos (temperatura máxima e mínima do ar), no sertão do estado do Ceará. O trabalho foi desenvolvido a partir de dados de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação das estações convencionais da região do sertão cearense, obtidos com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para comparar os valores de  $ET_0$  estimados por PM-FAO 56 com dados completos e mínimos foram considerados a razão entre as médias ( $\xi$ ), o erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de correlação ( $r$ ), índice de exatidão ou concordância ( $d$ ) e índice de confiança ou desempenho ( $c$ ). Foram confeccionados mapas de  $ET_0$  por PM-FAO 56 com dados mínimos para a mesorregião do sertão do Ceará, por meio do interpolador linear IDW (Ponderação do Inverso da Distância). O procedimento de estimativas de  $ET_0$  por PM-FAO 56 com dados de temperatura máxima e mínima do ar funcionou satisfatoriamente e por meio da espacialização e geração de mapas temáticos, foi possível visualizar a  $ET_0$  nas mais remotas áreas da região de estudo.

**Palavras-chave** – Clima semiárido. Disponibilidade de dados climáticos. Recursos hídricos.

**Abstract** - In areas of semiarid climate, water resources are limited and seriously threatened by excessive exploitation. This study's objective is to evaluate the performance of the method FAO 56 Penman-Monteith (PM-FAO 56) to estimate the reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) with minimum data (maximum and minimum air temperature) in the backcountry of the state of Ceará. The work was developed based on maximum and minimum air temperatures, relative air humidity, wind speed, and insolation of the conventional stations of the backcountry of Ceará, obtained from the National Institute of Meteorology (INMET). To compare the values of  $ET_0$  estimated by FAO PM-56 with complete data where the minimum was considered the ratio between the mean ( $\xi$ ), the standard error of estimation (SEE), correlation coefficient ( $r$ ), accuracy or concordance index ( $d$ ) and performance or confidence index ( $c$ ). Maps of  $ET_0$  by PM-FAO 56 were made with minimum data for the mesoregion of the backcountry of Ceara, by means of the inverse distance weighted (IDW). The following of estimates of  $ET_0$  by PM-FAO 56 with maximum and minimum air temperatures worked satisfactorily and by means of spatialisation and generation of thematic maps, it was possible to visualize the  $ET_0$  in the most remote areas of the region of the study.

**Key words** - Semiarid climate. Availability of climate data. Water resources.

\*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 14/02/2013 e aprovado em 17/11/2013.

<sup>1</sup>Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia no Núcleo de Engenharia de Água e Solo, UFRB/NEAS, Cruz das Almas-BA, mairtong@hotmail.com

<sup>2</sup>Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícola na ESALQ/USP, Prof. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, IFSertão-PE Campus Salgueiro, dirceuarraes@gmail.com

<sup>3</sup>Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, UFC, eder\_ramon@hotmail.com

<sup>4</sup>Engenheira Agrônoma, Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia no Núcleo de Engenharia de Água e Solo, UFRB/NEAS, narinhatosta\_@hotmail.com

<sup>5</sup>Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Mestrando em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB, ailtonjuniorid@hotmail.com

## Introdução

A água e o solo são recursos fundamentais do ambiente natural para as atividades agrícolas, e a disponibilidade dos recursos hídricos é essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Tanto para o consumo humano como para a produção agrícola, os recursos hídricos estão cada vez mais escassos. Tornando-se necessário um planejamento mais eficaz do aproveitamento da água, com desenvolvimento de metodologias que permitam estimar volumes cada vez mais exatos para obtenção de ótima produção nos cultivos agrícolas (SYPPERRECK *et al.*, 2008).

Em regiões de clima semiárido onde os recursos hídricos são limitados e seriamente ameaçados pela excessiva exploração, é essencial a estimativa das necessidades hídricas com maior precisão (JABLON; SAHLI, 2008). A baixa pluviosidade, altas temperaturas e altas taxas de evaporação podem representar dificuldades para os pequenos agricultores das zonas rurais do Nordeste do Brasil (ANDRADE *et al.*, 2011).

A estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, para a previsão da produção agrícola, para a programação de irrigação e para a resolução de problemas no domínio da hidrologia e meteorologia (GOCIC; TRAJKOVIC, 2010).

Existem vários métodos para estimar a  $ET_0$ , mas o desempenho dos mesmos em diferentes ambientes variam, já que todos eles têm algum conhecimento empírico (SENTELHAS *et al.*, 2010). No entanto, o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO no seu manual 56, foi estabelecido como um padrão para a determinação da  $ET_0$  (ALLEN *et al.*, 1998).

A estimativa da  $ET_0$  pela equação de Penman-Monteith FAO 56 só é possível quando um conjunto de dados completos do clima está disponível (SENTELHAS *et al.*, 2010), porém Allen *et al.* (1998) sugerem que este método também pode ser usado com poucos dados climáticos, estimando os dados em falta.

Quando dados de velocidade do vento não estão disponíveis, recomenda-se a utilização de dados observados em um local próximo, dentro da mesma região homogênea, de preferência levando em consideração a variabilidade sazonal do vento (ALLEN *et al.*, 1998).

Quando os dados de umidade relativa do ar estão faltando, o déficit de pressão de vapor pode ser estimado com base em dados de temperatura do ar, a pressão real de vapor é obtida, assumindo que a temperatura do ponto de orvalho é próxima da temperatura mínima diária, que geralmente é observado no início da manhã nas estações meteorológicas de referência (ALLEN *et al.*, 1998; JABLON; SAHLI, 2008).

Procedimentos para validação do método de Penman-Monteith FAO para o cálculo da  $ET_0$  com dados limitados têm sido empregado em diferentes países e condições climáticas, como: Bulgária (POPOVA *et al.*, 2006); China (CAI *et al.*, 2007); Tunísia (JABLON; SAHLI, 2008); Servia (GOCIC; TRAJKOVIC, 2010) e Canadá (SENTELHAS *et al.*, 2010). No Brasil, o cálculo da  $ET_0$  com dados limitados foi empregado no estado de Minas Gerais (LIMA, 2005) e Ceará (SILVA *et al.*, 2010; ROCHA *et al.*, 2011).

Dessa forma, objetivou-se com este estudo avaliar o desempenho do método Penman-Monteith FAO para estimar a  $ET_0$  com dados de temperatura máxima e mínima do ar, no sertão do estado do Ceará.

## Material e Métodos

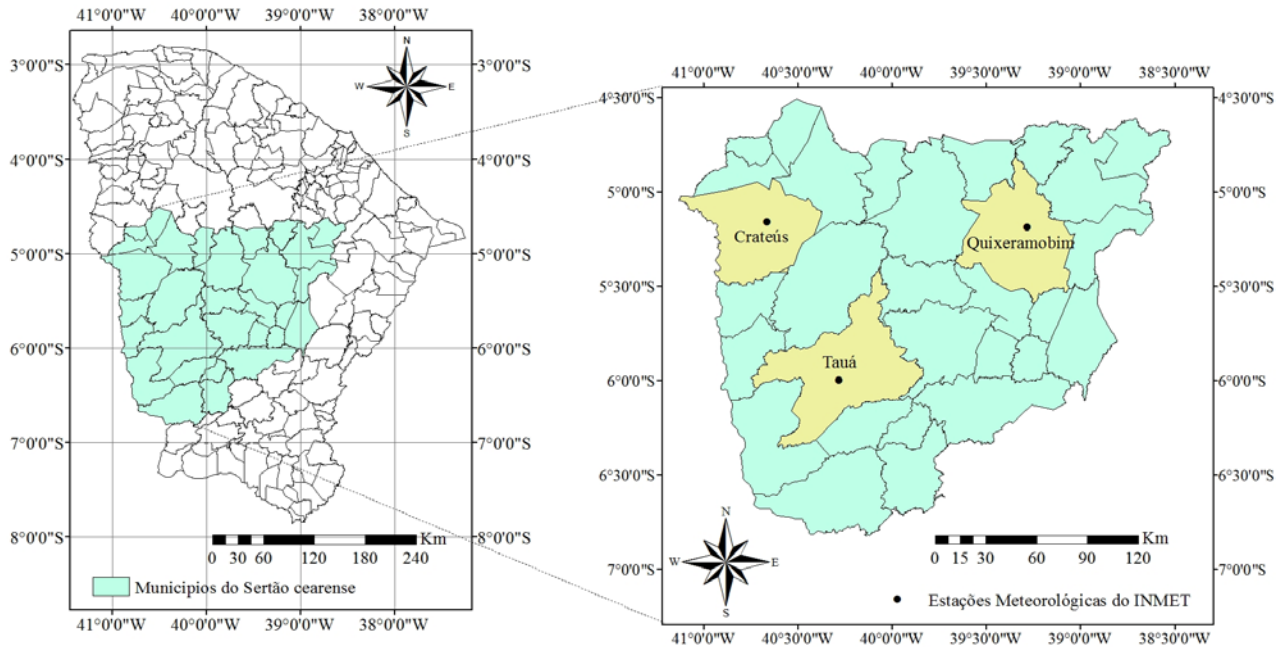
Devido ao número reduzido de estações meteorológicas convencionais no estado do Ceará e principalmente na região dos sertões, no presente trabalho foram utilizados dados de apenas três (Crateús, Quixeramobim e Tauá) (Figura 1). Utilizaram-se ainda dados de estações do próprio estado do Ceará e também do Piauí, com o propósito de evitar tendenciosidade no processo de interpolação dos dados (Tabela 1).

Para realização do trabalho obtiveram-se dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação. Após a obtenção dos dados, os mesmos foram organizados em escala mensal. Os dados foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

Para confecção dos mapas de  $ET_0$  por Penman-Monteith FAO com dados mínimos para a mesorregião dos sertões do estado do Ceará, foi aplicado o interpolador linear IDW (Inverse Distance Weighted – Ponderação do Inverso da Distância), em que o peso da célula a ser interpolada é dado por uma média ponderada que utiliza o peso dos pontos de controle mais próximos, ponderados pelo inverso da distância elevado a um expoente ( $m=2$ ), sendo uma das técnicas de interpolação mais usadas para pontos espalhados espacialmente.

A mesorregião dos sertões do estado do Ceará é composta de 30 municípios, na qual está dividida em quatro microrregiões: Sertão de Crateús (9 municípios); Sertão de Inhamus (6 municípios); Sertão de Quixeramobim (7 municípios) e Sertão de Senador Pompeu (8 municípios).

O município de Crateús está situado na microrregião geográfica do Sertão de Crateús. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo BSw'h', é quente com temperaturas máximas em outubro, temperatura média



**Figura 1** - Localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas neste estudo, no sertão do estado do Ceará, Brasil.

**Tabela 1** - Localização das estações meteorológicas

Estação	Estado	Latitude	Longitude	Altitude	Período
82392 - Sobral	CE	3°41'	40°21'	69,4	1961-2011
82474 - Caldeirão	PI	4°16'	41°05'	160,0	1979-2012
82588 - Morada Nova	CE	5°06'	38°22'	52,1	1963-2011
82583 - Crateús	CE	5°10'	40°40'	274,7	1973-2011
82586 - Quixeramobim	CE	5°11'	39°17'	191,7	1961-2011
82683 - Tauá	CE	6°00'	40°17'	402,6	1964-2011
82686 - Iguatu	CE	6°21'	39°18'	217,2	1961-2011
82780 - Picos	PI	7°04'	41°28'	206,4	1974-2012
82777 - Campos Sales	CE	7°04'	40°22'	566,3	1963-2011

anual de 26° a 28°C e precipitação média anual de 731,2 mm, concentrada no período de janeiro a abril.

O município de Quixeramobim está situado na parte central do estado, na microrregião geográfica do Sertão de Quixeramobim. O clima é do tipo tropical quente semiárido, enquadrando-se na classificação climática de Köppen como BSw'h'. A precipitação pluviométrica média anual é de 707,7 mm e temperatura média anual de 26° a 28°C.

O município de Tauá está situado na microrregião geográfica do Sertão de Inhamuns. O clima é do tipo BSw'h', segundo a classificação de Köppen, quente e semiárido, com temperatura superior a 18°C no mês mais frio e precipitação média anual de 550 a 650 mm.

O procedimento de estimativa dos parâmetros para cálculo da evapotranspiração de referência 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).

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

em que:  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>;  $R_n$  é a radiação líquida total do gramado, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;  $G$  é densidade do fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;  $T_m$  é a temperatura média diária do ar, °C;  $u_2$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>;  $e_s$  é a pressão de

saturação de vapor, kPa;  $e_a$  é a pressão parcial de vapor, kPa;  $e_s - e_a$  é o déficit de saturação de vapor, kPa;  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto de  $T_m$ , kPa °C<sup>-1</sup>;  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>.

A estimativa da pressão parcial de vapor ( $e_a$ ) foi obtida substituindo a temperatura do ponto de orvalho pela temperatura mínima diária do ar, menos 2°C ( $T_d = T_n - 2^\circ\text{C}$ ), conforme sugerido por Allen *et al.* (1998) para climas semiáridos.

$$e_a = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T_d}{T_d + 237,3}\right) \quad (2)$$

A radiação solar global ( $R_s$ ) foi estimada através do método de Hargreaves e Samani (1982), equação 3.

$$R_s = K_{rs} \cdot (T_x - T_n)^{0,5} \cdot R_a \quad (3)$$

em que:  $R_a$  é a radiação no topo da atmosfera, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;  $K_{rs}$  é o coeficiente de ajuste empírico ( $K_{rs}$ ), sendo utilizado no presente trabalho o valor de 0,16, recomendado para regiões continentais;  $T_x$  e  $T_n$  é a temperatura máxima e mínima do ar, °C.

Quando não se dispõem de dados de velocidade do vento ( $u_2$ ) registrados, recomenda-se utilizar a  $u_2$  média de 2 m s<sup>-1</sup>, conforme descrito por Allen *et al.* (1998), em função desse número ser uma média de 2000 estações meteorológicas ao redor do globo. Para realizar uma análise da influência dos valores da velocidade do vento, optou-se nesse trabalho avaliar os valores fixos de  $u_2$  de 1,0; 1,5; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5 m s<sup>-1</sup>.

A comparação dos valores de  $ET_0$  obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO 56 com dados completos e com dados mínimos (temperatura máxima e mínima) foi realizada usando o erro padrão de estimativa (EPE) e a razão entre as médias ( $\xi$ ), equações 4 e 5. Utilizou-se o índice “d” de concordância ou exatidão (WILLMOTT *et al.*, 1985), onde seus valores variam de “0” (não existe concordância) a “1” (concordância perfeita), equação 6 e como parâmetro estatístico de comparação, utilizou-se um índice de confiança ou desempenho “c”, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), reunindo os índices de precisão “r” e de exatidão “d”, sendo expresso por ( $c = r \cdot d$ ).

$$EPE = \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n - 1} \right]^{0,5} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{\bar{P}_i}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{O}) + (O_i - \bar{O})]} \right] \quad (6)$$

em que: EPE é o erro padrão de estimativa, mm dia<sup>-1</sup>;  $P_i$  é a evapotranspiração de referência estimada com dados mínimos, mm dia<sup>-1</sup>;  $O_i$  é a evapotranspiração de referência estimada com dados completos, mm dia<sup>-1</sup>;  $\bar{P}$  é a média da evapotranspiração de referência estimada com dados mínimos, mm dia<sup>-1</sup>;  $\bar{O}$  é a média da evapotranspiração de referência estimada com dados completos, mm dia<sup>-1</sup>;  $\xi$  é a razão entre as médias, %.

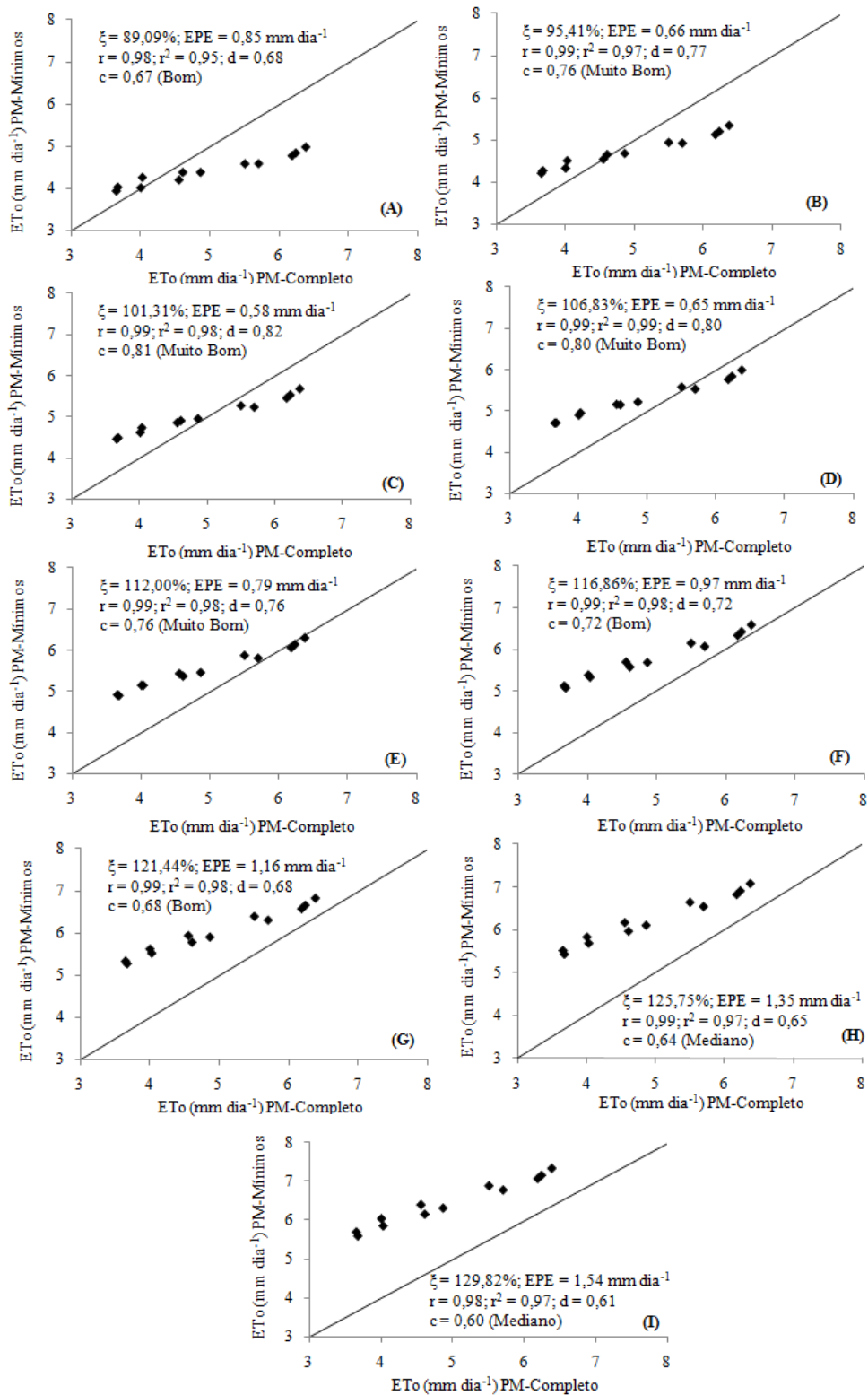
O índice de desempenho “c” é interpretado e distribuído nas seguintes classes: “Ótimo”,  $c > 0,85$ ; “Muito Bom”,  $0,76 \leq c \leq 0,85$ ; “Bom”,  $0,66 \leq c \leq 0,75$ ; “Mediano”,  $0,61 \leq c \leq 0,65$ ; “Sofrível”,  $0,51 \leq c \leq 0,60$ ; “Mau”,  $0,41 \leq c \leq 0,50$  e “Péssimo”,  $c \leq 0,40$  (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

## Resultados e discussão

Os índices estatísticos da comparação das estimativas de  $ET_0$  por Penman-Monteith FAO com dados completos e mínimos em Crateús-CE são apresentados na Figura 2. O melhor desempenho foi encontrado com os valores fixos de velocidade do vento ( $u_2$ ) de 2,0 e 2,5 m s<sup>-1</sup> (Figuras 2C e 2D), superestimando a  $ET_0$  com dados completos em apenas 1,31% (0,10 mm dia<sup>-1</sup>) e 6,83% (0,30 mm dia<sup>-1</sup>), respectivamente.

O erro padrão de estimativa (EPE) foi de 0,58 e 0,65 mm dia<sup>-1</sup> com os valores de  $u_2$  supracitadas acima, e o índice “d” de concordância ou exatidão (WILLMOTT *et al.*, 1985) foi de 0,82 e 0,80, respectivamente. O índice de desempenho “c” foi de 0,81 e 0,80, respectivamente e segundo Camargo e Sentelhas (1997), classificado como “Muito Bom”. Desempenho “Muito Bom” também foi verificado com os valores de  $u_2$  de 1,5 e 3,0 m s<sup>-1</sup> (Figuras 2B e 2E), porém com valores de “c” inferiores aos citados acima, de 0,76.

Os resultados estão de acordo com os observados em outros estudos, em que o método de Penman-Monteith FAO foi avaliado para estimar a  $ET_0$  com dados limitados na Bulgária (POPOVA *et al.*, 2006) e Tunísia (JABLON; SAHLI, 2008), e para velocidade do vento quando não se tem dados disponíveis utilizaram o valor fixo de 2 m s<sup>-1</sup> recomendado pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998), e verificaram que esse valor tende a superestimar  $ET_0$  padrão.



**Figura 2** - Índices estatísticos da comparação de  $ET_0$  com dados completos e mínimos (temperatura máxima e mínima) mensais, utilizando valores fixos de velocidade do vento, de 1,0 m s<sup>-1</sup> (A); 1,5 m s<sup>-1</sup> (B); 2,0 m s<sup>-1</sup> (C); 2,5 m s<sup>-1</sup> (D); 3,0 m s<sup>-1</sup> (E); 3,5 m s<sup>-1</sup> (F); 4,0 m s<sup>-1</sup> (G); 4,5 m s<sup>-1</sup> (H) e 5,0 m s<sup>-1</sup> (I), para Crateús no estado do Ceará



As estimativas de  $ET_o$  por Penman-Monteith FAO com dados completos e mínimos em Quixeramobim-CE são apresentadas na Figura 3. Observou-se que o melhor desempenho foi encontrado utilizando-se dos valores fixos de  $u_2$  de 3,0; 3,5 e 4,0  $m\ s^{-1}$  (Figuras 3E, 3F e 3G). Quando foi utilizado o valor de  $u_2$  de 3,0  $m\ s^{-1}$ , verificou-se subestimativas de  $ET_o$  em relação a Penman-Monteith com dados completos, de apenas 1,12% (0,06  $mm\ dia^{-1}$ ), ou seja, bem próximo das estimativas com dados completos. Com os valores de  $u_2$  de 3,5 e 4,0  $m\ s^{-1}$  ocorreu superestimativas de  $ET_o$  de 3,09% (0,17  $mm\ dia^{-1}$ ) e 7,05% (0,39  $mm\ dia^{-1}$ ), respectivamente.

O EPE foi de 0,71; 0,70 e 0,75  $mm\ dia^{-1}$ , respectivamente para os valores fixos de velocidade do vento citados acima, o índice “d” foi de 0,83; 0,84 e 0,83 e índice “c” de 0,82; 0,83 e 0,82 e classificado como “Muito Bom”, respectivamente.

Desempenho “Muito Bom” também foi verificado com os valores fixos de  $u_2$  de 2,5; 4,5 e 5,0  $m\ s^{-1}$  (Figuras 3D, 3H e 3I), porém com índice “c” inferior aos valores supracitados acima, de 0,78; 0,80 e 0,77, respectivamente. Ocorrendo subestimativas de  $ET_o$  quando comparado com os dados completos para o valor de  $u_2$  de 2,5  $m\ s^{-1}$ , de 5,60% (0,30  $mm\ dia^{-1}$ ) e superestimativas com os valores de 4,5 e 5,0  $m\ s^{-1}$  em 10,78% (0,58  $mm\ dia^{-1}$ ) e 14,29% (0,78  $mm\ dia^{-1}$ ), respectivamente.

Segundo Lima (2005), a velocidade do vento é um elemento climático relevante no cálculo da evapotranspiração, pois o processo de remoção do vapor de água depende, em grande parte, do vento e da turbulência que transfere o ar sobre a superfície evaporante, principalmente em regiões áridas e ventosas (POPOVA *et al.*, 2006).

Os índices estatísticos da comparação das estimativas de  $ET_o$  por Penman-Monteith FAO com dados completos e mínimos em Tauá-CE são apresentados na Figura 4. O melhor desempenho ocorreu quando se utilizou os valores de  $u_2$  de 1,5 e 2,0  $m\ s^{-1}$ , com valores de “c” de 0,83 e 0,82, e classificado como “Muito Bom”, respectivamente (Figuras 4B e 4C).

Nas condições climáticas da Bulgária quando a velocidade do vento não era disponível, segundo os procedimentos sugeridos por Allen *et al.* (1998) para a calcular a  $ET_o$  por PM-FAO, foi usada a velocidade do vento média anual regional ou importar dados de estações próximas (POPOVA *et al.*, 2006).

Alguns autores avaliaram o método de Penman-Monteith com dados mínimos e concluíram que, no sul de Ontário no Canadá o método PM-FAO é aceitável para estimar  $ET_o$  quando a velocidade do vento não está disponível (SENTELHAS *et al.*, 2010); nas condições climáticas do sertão cearense o procedimento utilizado de estimar a  $ET_o$  a partir de dados de temperatura máxima

e mínima do ar apresentou resultados aceitáveis, tendo em vista, pela análise dos índices estatísticos, podendo ser empregado para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação, bem como para um manejo de irrigação adequado.

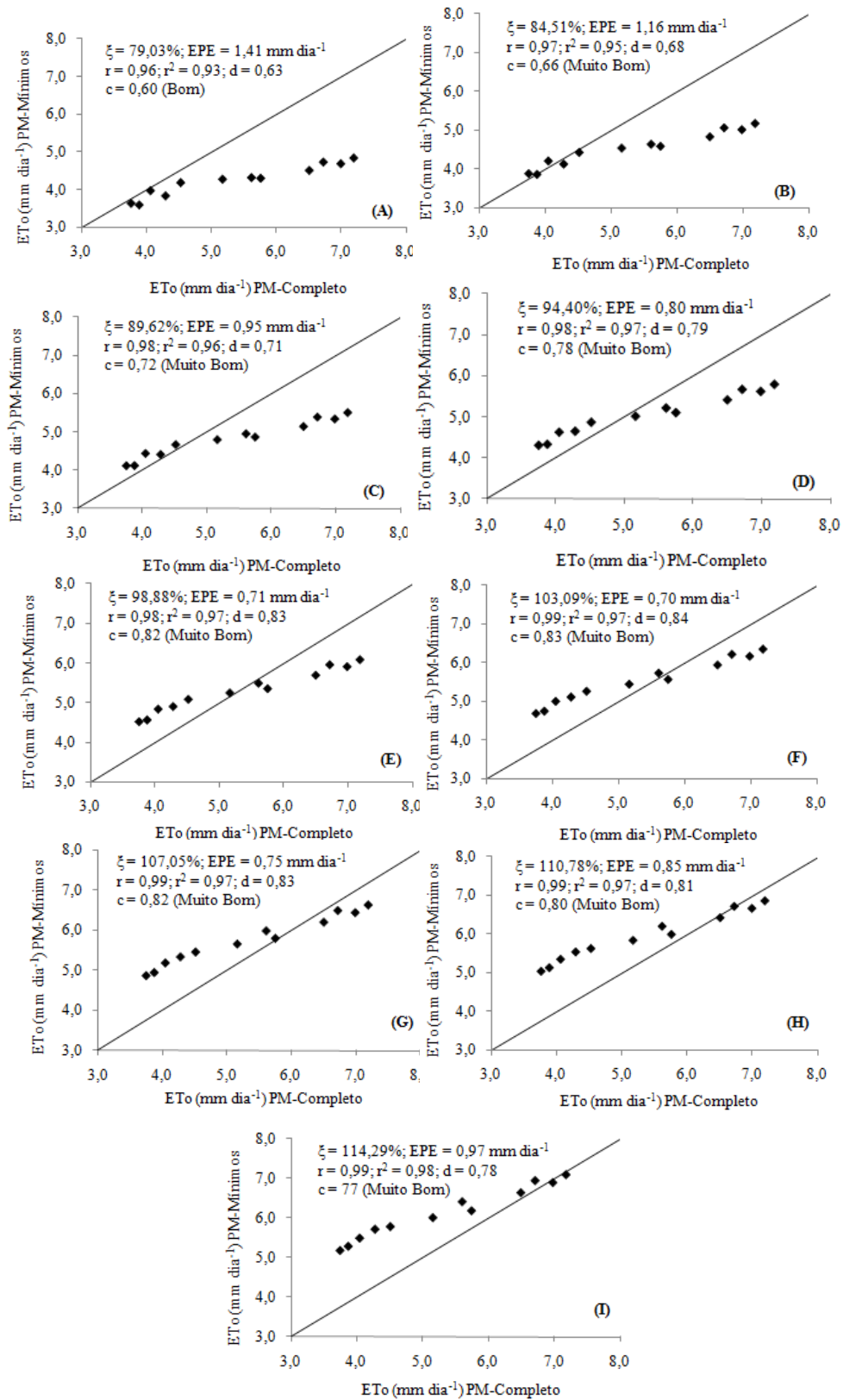
A espacialização da  $ET_o$  por Penman-Monteith FAO com dados mínimos na mesorregião dos sertões do estado do Ceará encontra-se apresentada na Figura 5. Verificou-se um aumento linear na  $ET_o$ , a medida que aumenta o valor fixo de velocidade do vento, ou seja, os menores valores de  $ET_o$  ocorreram com o valor fixo de  $u_2$  de 1,0  $m\ s^{-1}$  (Figura 5A), em contra partida, as maiores estimativas de  $ET_o$  ocorreram com a adoção do valor de  $u_2$  de 5,0  $m\ s^{-1}$  (Figura 5I).

Os maiores valores de  $ET_o$  foram obtidos na microrregião do Sertão de Crateús, na divisa com a mesorregião do Noroeste cearense, em parte da microrregião do Sertão de Inhamuns na divisa com o estado do Piauí. Verificou-se também os maiores valores de  $ET_o$  em parte da microrregião do Sertão de Quixeramobim, na divisa com a mesorregião do Jaguaribe. Os menores valores de  $ET_o$  ocorreram na parte central do sertão, e também na maior parte da microrregião do Sertão de Inhamuns com divisa na microrregião da Chapada do Araripe (Campos Sales).

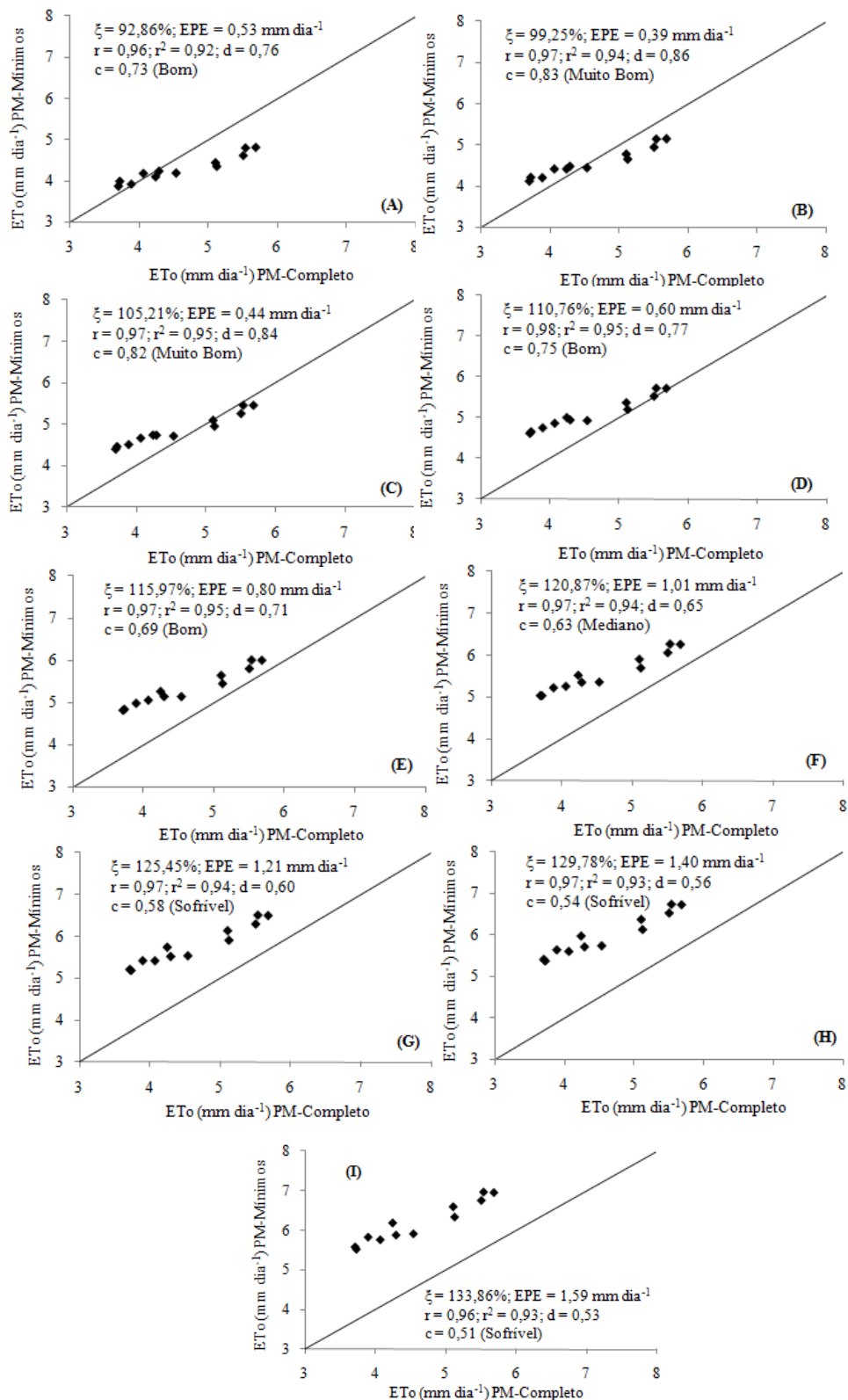
No estado de Minas Gerais, na comparação entre os resultados obtidos com diferentes valores de velocidades do vento, notou-se redução na precisão da  $ET_o$  para  $u_2$  a partir de 3  $m\ s^{-1}$ , sendo mais notável a 5  $m\ s^{-1}$  (LIMA, 2005). Ainda segundo o autor, esperava-se redução nos valores das correlações com o aumento da velocidade do vento, pois, nessas situações, os valores de evapotranspiração aumentariam, diferenciando daqueles que utilizam a velocidade do vento registrada. Mesmo assim, os resultados da  $ET_o$  determinados somente com a utilização da temperatura em grande parte das regiões mineiras foram satisfatórios.

A modelagem espacial da  $ET_o$  permite a compreensão da variabilidade espacial e temporal da demanda hídrica das diversas regiões (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Mapas de distribuição espacial fornecem informações valiosas no planejamento e gestão dos recursos hídricos em uma bacia ou região, já que a distribuição espacial dos valores anuais e sazonais de  $ET_o$  é um importante componente do ciclo hidrológico (XU *et al.*, 2006).

Rocha *et al.* (2011) avaliaram a metodologia de estimativa da  $ET_o$  PM-56 utilizando dados mínimos integrados a um Sistema de Informação Geográfica na bacia do Jaguaribe no Ceará e concluíram que a metodologia para estimativa de  $ET_o$  com dados mínimos funcionou satisfatoriamente na região estudada.

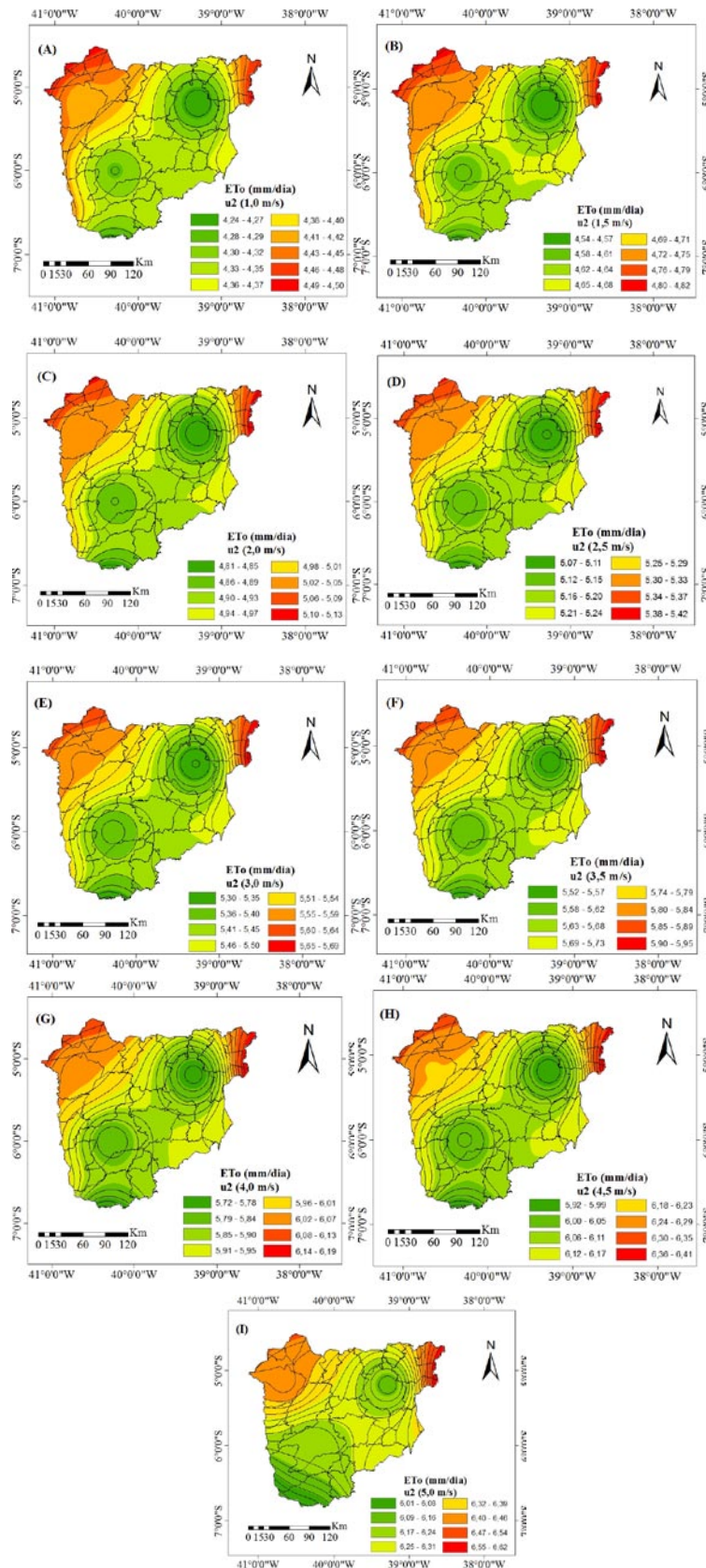


**Figura 3** - Índices estatísticos da comparação de  $ET_0$  com dados completos e mínimos (temperatura máxima e mínima) mensais, utilizando valores fixos de velocidade do vento, de 1,0 m s<sup>-1</sup> (A); 1,5 m s<sup>-1</sup> (B); 2,0 m s<sup>-1</sup> (C); 2,5 m s<sup>-1</sup> (D); 3,0 m s<sup>-1</sup> (E); 3,5 m s<sup>-1</sup> (F); 4,0 m s<sup>-1</sup> (G); 4,5 m s<sup>-1</sup> (H) e 5,0 m s<sup>-1</sup> (I), para Quixeramobim no estado do Ceará.



**Figura 4** - Índices estatísticos da comparação de  $ET_0$  com dados completos e mínimos (temperatura máxima e mínima) mensais, utilizando valores fixos de velocidade do vento, de  $1,0 m s^{-1}$  (A);  $1,5 m s^{-1}$  (B);  $2,0 m s^{-1}$  (C);  $2,5 m s^{-1}$  (D);  $3,0 m s^{-1}$  (E);  $3,5 m s^{-1}$  (F);  $4,0 m s^{-1}$  (G);  $4,5 m s^{-1}$  (H) e  $5,0 m s^{-1}$  (I), para Tauá no estado do Ceará.





**Figura 5** - Distribuição espacial da  $ET_0$  por Penman-Monteith com dados mínimos para diferentes valores fixos de velocidade do vento, 1,0 m s<sup>-1</sup> (A), 1,5 m s<sup>-1</sup> (B), 2,0 m s<sup>-1</sup> (C), 2,5 m s<sup>-1</sup> (D), 3,0 m s<sup>-1</sup> (E), 3,5 m s<sup>-1</sup> (F), 4,0 m s<sup>-1</sup> (G), 4,5 m s<sup>-1</sup> (H) e 5,0 m s<sup>-1</sup> (I), na mesorregião dos sertões do estado do Ceará.

## Conclusões

O procedimento de estimativas de  $ET_0$  pelo método de Penman-Monteith com dados de temperatura máxima e mínima do ar funcionou satisfatoriamente na região de estudo.

Por meio da espacialização e geração de mapas temáticos, foi possível visualizar a demanda evapotranspirométrica nas mais remotas áreas da região de estudo.

## Literatura científica citada

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

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, M. M. A.; MENDONÇA, M. A. B.; CHAVES, L. C. G.; FEITOZA, R. M. Investigation of the maximum and minimum temperatures in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 5, n. 2, p. 82-87, 2011.

CAI, J.; LIU, Y.; LEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, 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**, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.

LIMA, E. P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperatura máxima e mínima de Minas Gerais**. Minas Gerais, 2005. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV.

OLIVEIRA, J. B.; ARRAES, F. D. D.; VIANA, P. C. Methodology for the spatialisation of a reference evapotranspiration from SRTM data. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 445-454, jul-set, 2013.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing  $ET_0$  with limited data. Application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, 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  $E_{to}$  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.

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**, v. 97, n. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, Í. 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. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 6, n. 3, p. 42-48, 2010a.

SYPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, supl., p. 603-609, 2008.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

XU, C.-Y.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, SINGH, D. V. P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v. 327, p. 81-93, 2006.