Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Avaliação da evapotranspiração de referência diária, estimada pelo método tanque classe A, para Campina Grande, PB

Jório Bezerra Cabral Júnior¹, Rebecca Luna Lucena² e Hermes Alves de Almeida³

¹Prof. Dr. do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A.C. Simões (Maceió/Sede). Av. Lourival de Melo Mota, Bairro Cidade Universitária, Maceió/AL - Brasil, CEP 57072-970, e-mail: jorio.cabral@gmail.com; (Autor Correspondente)

²Profa. Dra. do Departamento de Geografia do Centro de Ensino Superior do Seridó (DGC/CERES/ Campus Caicó) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Rua José Evaristo, Penedo, Caicó/RN – Brasil, CEP: 59300-000, e-mail: rebecaosvaldo@yahoo.com.br;

³Prof. Dr. do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional (PPGDR) ambos da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB, Campus I – Campina Grande), Rua Baraúnas, Bodocongó, Campina Grande/PB - Brasil, CEP: 58429-500, e-mail: hermes.almeida@uol.com.br

Artigo recebido em 06/04/2018 e aceito em 05/12/2018

RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_0) é um dos elementos meteorológicos mais importantes do ciclo hidrológico e exerce impacto direto na disponibilidade hídrica, sendo a ET_0 obtida pelo método do Tanque Classe A (ET_0TCA) um dos métodos de estimativas mais simplificados. O objetivo principal neste trabalho foi o de obter índices de desempenho desse método comparado ao método padrão de Penman-Monteith ($ET_0PM-FAO$) para Campina Grande, PB. Os dados meteorológicos diários do período de 01.01.2000 a 31.12.2016, necessários às equações dos respectivos métodos, foram disponibilizados pela EMBRAPA Algodão. Os índices estatísticos preconizados por Willmott et al. (1985) foram utilizados para averiguar a precisão e exatidão. Os principais resultados indicaram que os índices de desempenho da ET_0TCA alcançaram o máximo apenas como mediano (" c " $\leq 0,58$), nas quatro estações do ano. Para os maiores índices de exatidão (0,71) e de desempenho (0,58) da ET_0TCA ocorreram na primavera ao utilizar o coeficiente (K_p) proposto por Cuenca (1989), assim como obtiveram, sazonalmente, os menores erros: médio (0,29) e o desvio médio quadrado (0,33). Entretanto, considera-se que as estimativas da ET_0TCA não alcançaram desempenho considerado bom (" c " $> 0,70$), portanto não se recomenda utilizá-lo para a referida localidade.

Palavras-Chave: demanda hídrica, métodos de estimativa, semiárido, hidrometeorologia.

Evaluation of daily reference evapotranspiration, estimated by method class A pan, for Campina Grande, PB

ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET_0) is one of the most important meteorological elements of the hydrological cycle and has a direct impact on water availability, with ET_0 being obtained by the Class A Pan (ET_0TCA) among the most simplified estimation methods. The main objective of this work was to obtain indices of performance of this method compared to the standard Penman-Monteith method ($ET_0PM-FAO$) for Campina Grande, PB. The daily meteorological data of the period 01.01.2000 to 12.31.2016, necessary to the equations of the respective methods, were made available by EMBRAPA Algodão. The statistical indices recommended by Willmott et al. (1985) were used to ascertain the accuracy and precision. The main results indicated that the ET_0TCA performance indexes reached the maximum only as median (" c " ≤ 0.58), in the four seasons of the year. For the highest (0.71) and performance (0.58) indices of ET_0TCA occurred in the spring when using the coefficient (K_p) proposed by Cuenca (1989), as well as seasonally the lowest errors: 0.29) and the mean square deviation (0.33). However, it is considered that the ET_0TCA estimates did not reach good performance (" c " > 0.70), so it is not recommended to use it for that locality.

Keywords: water demand, estimation methods, semiarid, hydrometeorology.

Introdução

A evapotranspiração de referência (ET_0) é um indicador meteorológico de demanda de água para atmosfera e, portanto, um dos principais componentes do balanço de água no solo. Por isso, a estimativa é de extrema importância para quantificar a água que deverá ser aplicada na irrigação e no manejo agrícola (Souza et al., 2011), especificamente, na região semiárida do Nordeste brasileiro, onde há elevados valores de ET_0 e índice de aridez (Cabral Júnior e Bezerra, 2017).

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization – FAO*) recomenda, como padrão, o uso do método da estimativa da ET_0 por meio do método de Penman-Monteith ($ET_{0PM-FAO}$) (Allen et al., 1998), por ser o mais preciso quando comparado com os valores medidos em lisímetros. No entanto, a sua determinação necessita de vários elementos meteorológicos medidos e/ou derivados que nem sempre estão disponíveis. Em virtude disto, a alternativa é utilizar métodos mais simples (Medeiros, 2002), dos quais se destaca o método do Tanque Classe A (Stanhill, 2002).

O procedimento para estimar a ET_0 , utilizando-se o Tanque Classe A (TCA), foi desenvolvido pelo serviço de Meteorologia Norte Americano (U.S.W.B) e é um método também recomendado pela FAO. Destaca-se, entretanto, que o TCA mede evaporação, sendo a conversão para ET_0 , obtida através de um coeficiente meteorológico estabelecido em função das condições de umidade relativa e vento local. Trata-se de um método bastante utilizado no Brasil e no mundo, em virtude da facilidade de manejo e do baixo custo de implantação (Irmak et al., 2002; Stanhill, 2002; Bernardo et al., 2005; Braga et al., 2008; Cunha, 2011; Pereira et al., 2013; Peixoto et al., 2014).

A conversão do valor da evaporação, medida no TCA, para ET_0 é feita usando um fator de correção, denominado coeficiente do tanque (K_p). Os valores do K_p são determinados com base em equações empíricas que consideram os valores médios diários de umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (U_2), comprimento da bordadura do tanque (F) e a cobertura do solo, onde o TCA está instalado (Doorenbos e Pruitt, 1977; Mendonça et al., 2006; Braga et al., 2008; Peixoto et al., 2014).

Existem diversas metodologias para a determinação do K_p , dentre elas cita-se as de: Cuenca (1989), Snyder (1992), Pereira et al. (1995) e Allen et al. (1998). No entanto, a estimativa mais

precisa da ET_0 estimada pelo método do TCA (ET_{0TCA}) depende, em parte, das medidas de ajustes que determinarão o K_p .

Cunha et al. (2013) avaliaram dados de ET_{0TCA} calculados com diferentes K_p 's, em Goiás, e concluíram que, até para uma mesma localidade a acuracidade do K_p varia em função das condições do tempo, especialmente, das condições do regime pluvial.

Em uma região semiárida da província da Índia, Gundekar et al. (2008) encontraram valores distintos da ET_{0TCA} ao calcular por diferentes K_p , no inverno. Esses autores analisaram os referidos métodos de Cuenca, Allen et al., Pereira et al. e Snyder, e concluíram que o K_p obtido pelo método de Snyder apresentou maior precisão.

No Nordeste do Brasil, especialmente, no semiárido, constata-se que, há a necessidade de mais estudos adotando-se o método do TCA, utilizando-se diferentes metodologias de K_p . Neste contexto, citam-se, os trabalhos realizados por Peixoto et al. (2014), em Mossoró, RN, e o de Pereira et al. (2014), no médio Pajeú, PE. O primeiro trabalho encontrou que o K_p proposto por Snyder, apresentou melhor desempenho enquanto que, no segundo, o resultado foi o oposto, ou seja, o referido K_p foi um dos piores.

Nos perímetros irrigados do submédio do Rio São Francisco, na Bahia, Braga et al. (2008) recomendaram a utilização do K_p proposto por Pereira et al.. Enquanto que Sousa et al. (2010), para as mesmas condições de áreas irrigadas do Estado de Sergipe, não recomendam o uso do método do TCA, em virtude da imprecisão na estimativa comparado a $ET_{0PM-FAO}$.

Diante disto, o objetivo principal neste trabalho foi o de estimar, caracterizar e avaliar a ET_0 estimada pelo método do Tanque Classe A (utilizando-se diferentes K_p 's) comparando-a com o método padrão de Penman-Monteith-FAO, analisando, através de índices estatísticos, o desempenho da ET_{0TCA} para as condições geográficas e climáticas de Campina Grande, PB.

Material e métodos

Área de estudo

A localização com a caracterização climática (pluvial e térmica) da área de estudo, localizada no município de Campina Grande (7° 13' 00" Sul, 35° 53' Oeste e 547,6 m), inserida na região Nordeste do Brasil e estado da Paraíba, encontra-se na Figura 1.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, Campina Grande-Paraíba, com as respectivas características hipsométricas e climáticas (pluvial e da temperatura do ar) referente a 3° normal (1981 a 2010) e o ponto onde realizou a observação dos dados (estação meteorológica convencional).

O regime de chuvas na referida localidade concentra-se de março a julho, para esses meses os acumulados mensais médios são superiores aos 100 mm/mês, de acordo com os dados referentes a terceira normal climatológica (1981-2010) estabelecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018). Para Almeida e Cabral Júnior (2014), nesta localidade, o outono e inverno são mais chuvosos e por outro lado a primavera é a estação mais seca, acumulando menos de 10% do total precipitado anualmente.

As temperaturas médias mensais, calculadas pelo método padrão, apresentam-se com menor variabilidade, comparadas a precipitação, sendo as maiores temperaturas registradas no trimestre de janeiro-fevereiro-março, média de 24,5°C, e as menores em julho-agosto, média de 21,3°C. Cabral Júnior et al. (2013) analisaram com mais detalhes essas variações e encontraram que as médias para o verão, outono, inverno e primavera são respectivamente de 24,4°C, 23,9°C, 21,5°C e 23,2°C.

A velocidade média do vento anual para Campina Grande é na ordem de 4,11 m/s (Santos e

Silva, 2013), com maior velocidade em setembro (~4,5 m/s) e menor velocidade em março (~3,4 m/s).

Ao aplicar a classificação climática, de acordo com o modelo estabelecido por Köppen (1948), nota-se que a área é definida como tropical chuvosa, cuja temperatura média do ar no mês mais frio supera 18°C e a precipitação média anual é maior que 700 mm, com registro do período menos chuvoso na primavera-verão. Para essas condições a fórmula climática é determinada como “As” (Alvares et al., 2014). Entretanto, ressalta-se que mesmo Campina Grande obtendo essa classificação climática, a mesma localiza-se na região Semiárida do Brasil de acordo com a delimitação estipulada pelo Ministério da Integração Nacional (MI, 2017).

Procedimentos Metodológicos

Para a efetivação deste estudo foram utilizadas séries de dados diários de temperatura do ar, irradiância solar global, velocidade do vento, umidade relativa do ar (UR) e dados derivados da

UR, referentes ao período de 01.01.2000 a 31.12.2016, cedidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/Algodão) em Campina Grande-Paraíba.

Para dados faltantes foi realizado um preenchimento de falhas através da técnica *Multivariate Imputation by Chained Equations* (MICE) (Van Buuren e Groothuis-Oudshoorn, 2011). Essa técnica é utilizada para preenchimento de falhas de dados conforme procedimentos descritos por Costa et al. (2012). As imputações foram geradas de acordo com o método padrão, que é para dados numéricos através da média preditiva - PMM (*Predictive Mean Matching*).

Evapotranspiração de referência (ET_0) - método de Penman-Monteith - FAO

A ET_0 pelo método de Penman-Monteith FAO-56 foi estimada de acordo com os critérios estabelecidos em Allen et al. (1998), admitindo-se uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência do dossel de 70 s.m^{-1} e albedo de 23%, conforme a equação:

Figura 2. Perfil de instalação do Tanque Classe A com a Bordadura. Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998).

Para a conversão da evaporação do TCA em ET_0 , utilizou-se diferentes K_p 's a fim de escolher o que o melhor se ajusta às condições locais, de acordo com as equações:

a) Coeficiente de ajuste proposto por Snyder (1992):

$$K_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln(F) - 0,000376 \cdot U_2 + 0,0045 \cdot UR \quad (2)$$

b) Coeficiente de ajuste proposto por Cuenca (1989):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900 \cdot U_2}{T_{med} + 273} \right) DPV}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Em que R_n é o saldo do balanço de energia ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G é a densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{med} é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 é a velocidade média do vento a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - a pressão real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Evapotranspiração de referência (ET_0) - método do Tanque Classe A

A Figura 2 ilustra um Tanque Classe A (TCA), instalado sobre um estrado de madeira. Maiores detalhes e procedimentos operacionais constam no artigo de Allen et al. (1998).

$$K_p = 0,475 - (2,4 \cdot 10^{-4} U_2) + (5,16 \cdot 10^{-3} UR) + (1,18 \cdot 10^{-3} F) - (1,6 \cdot 10^{-5} UR^2) - (1,01 \cdot 10^{-6} F^2) - (8 \cdot 10^{-9} UR^2 \cdot U_2) - (1 \cdot 10^{-8} \cdot UR^2 \cdot F) \quad (3)$$

c) Coeficiente de ajuste proposto por Pereira et al. (1995):

$$K_p = 0,84(\Delta + \gamma) / [\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)] \quad (4)$$

d) *Coefficiente de ajuste proposto por Allen et al. (1998):*

$$Kp = 0,108 - 0,0286U_2 + 0,0422Ln(F) + 0,1434Ln(UR) - 0,000631[Ln(F)]^2Ln(UR) \quad (5)$$

Em que F - tamanho da bordadura do Tanque (F=10 m); U_2 - velocidade do vento a 2m de altura (km.dia⁻¹); UR - Umidade Relativa média do ar (%); Δ e γ - Definidos na equação de Penman-Monteith; $\frac{r_c}{r_a}$ - é a relação entre a resistência do dossel da grama à difusão do vapor d'água (r_c) e a resistência aerodinâmica para a troca do vapor d'água de uma superfície evaporante (r_a).

A relação empírica, $\frac{r_c}{r_a}$, foi calculada mediante os procedimentos propostos por Allen et al. (1989) e adotado pela FAO (Smith, 1991; Allen et al., 1998):

$$\frac{r_c}{r_a} = 0,34U_2 \quad (6)$$

De posse de cada coeficiente de ajuste (Kp), determinou-se a ET₀TCA, mediante a expressão:

$$ET_0TCA = ECA.Kp \quad (7)$$

Em que ECA, é a evaporação do tanque Classe A (mm.d⁻¹) e Kp o coeficiente do Tanque, que converte a ECA em ET₀, utilizando-se os valores das equações 2, 3, 4 e 5.

Métodos estatísticos

A correlação de Pearson foi utilizada para encontrar o grau de relação entre a variável independente (ET₀PM) com a variável dependente (ET₀TCA) representadas, respectivamente, por X e Y e "n" o número de observações (identificadas na equação 8).

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}} \quad (8)$$

O coeficiente da correlação de Pearson foi testado ao nível de 5% de significância através do teste t de Student. Procedimentos mais detalhados deste teste encontram-se em Draper e Smith (1996) e Spiegel (1972).

Em seguida utilizaram-se índices estatísticos de Willmott et al. (1985) para averiguar o distanciamento médio entre os valores de ET₀TCA e os do método padrão (ET₀PM). Dentre eles citam-se o índice de exatidão entre si (d), os erros: médio absoluto (EMA) e máximo (EMAX), quadrado médio do desvio (RMSE) e o índice de desempenho ("c"). Para a determinação desses índices foram utilizadas as equações de 9 a 13, respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad (10)$$

$$EMAX = MAX(|O_i - E_i|)^n \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$c = |r \times d| \quad (13)$$

Em que O_i : é o valor observado da ET₀PM; E_i : o valor observado da ET₀TCA; $\bar{O}$: a média dos valores da ET₀PM; n: é o número de observações.

O desempenho dos modelos de estimativas (c) foi determinado com base na metodologia proposta por Camargo e Sentelhas (1997), conforme identifica-se na Tabela 1.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de Desempenho.

Valor de "c"	Desempenho
>0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
≤ 0,30	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Nesta pesquisa foi utilizado o software estatístico livre “R” versão 3.3.1, para as análises estatísticas e confecções dos gráficos.

Resultados e discussão

As médias da ET_0 , em diferentes escalas temporais, são observadas na Figura 3. Sendo apresentada nas escalas diárias mensal (3A), sazonal (3B), da série histórica anual (3C) e a partir do Box-plot (3D) referentes à ET_0 PM-FAO e à ET_0 TCA para Campina Grande, de 2000 a 2016.

Observa-se que os menores valores de ET_0 ocorrem em junho e julho (Figura 3A) e os maiores de outubro e janeiro. Esses maiores valores diários mensais da ET_0 correspondem ao período sazonal da primavera-verão (Figura 3B), por outro lado os menores ocorrem no inverno (Figura 3B).

Constatou-se, Figura 3A, que houve uma superestimava da ET_0 TCA comparada a ET_0 PM, nos meses de outubro a fevereiro, quando se utilizou os K_p 's propostos por Snyder (1992), Allen et al. (1998), e Cuenca (1989), com uma superestimava média de 16,0; 8,2 e 5,1%, respectivamente. Por outro lado, ao utilizar o K_p preconizado por Pereira et al. (1995), os valores de

ET_0 TCA foram subestimados em todos os meses, oscilando de 18,8 % (dezembro) a 58,1% (julho) a menos em relação à ET_0 PM.

Em termos médios sazonais, Figura 3B, a ET_0 TCA utilizado o K_p proposto por Snyder foi o que mais se aproximou do método ET_0 PM-Padrão entre o outono-inverno, com um desvio inferior a 0,25 mm/dia nessas estações do ano. Para a primavera-verão o método que mais se aproximou da ET_0 PM foi a ET_0 TCA utilizando o K_p proposto por Cuenca, com um desvio médio, para esse período, de 0,12 mm/dia.

Na escala anual (Figuras 3C e 3D), verifica-se que as variações da ET_0 TCA foram sempre maiores quando comparadas à ET_0 PM.

Pôde-se constatar ainda que, em ordem decrescente (Figura 3D), as médias diárias da ET_0 por ano foram 3,7; 3,4; 3,3; 2,6 mm/dia/ano para a ET_0 TCA estimada, respectivamente, utilizando os K_p 's propostos por Snyder (1992); Allen et al. (1998); Cuenca (1989); Pereira et al. (1995). Ao se comparar com ET_0 PM-Padrão, essa foi sempre subestimada em relação à ET_0 TCA, exceto quando se utilizou o K_p determinado por Snyder (1992).

Figura 3. Médias diárias mensais (3A), sazonais (3B), anuais (3C) e os Box-plots anuais (3D) da evapotranspiração de referência, estimadas pelos métodos de Penman-Monteith-FAO (ET_0 PM) e Tanque Classe A (ET_0 TCA), este último aplicando-se diferentes coeficientes do tanque propostos por Snyder (ET_0 TCA_S), Allen et al., (ET_0 TCA_A), Cuenca (ET_0 TCA_C) e Pereira et al., (ET_0 TCA_P), para Campina Grande, PB, no período de 2000 a 2016.

Figura 3. Médias diárias mensais (3A), sazonais (3B), anuais (3C) e os Box-plots anuais (3D) da evapotranspiração de referência, estimadas pelos métodos de Penman-Monteith-FAO (ET_0PM) e Tanque Classe A (ET_0TCA), este último aplicando-se diferentes coeficientes do tanque propostos por Snyder (ET_0TCA_S), Allen et al., (ET_0TCA_A), Cuenca (ET_0TCA_C) e Pereira et al., (ET_0TCA_P), para Campina Grande, PB, no período de 2000 a 2016.

Figura 3. Médias diárias mensais (3A), sazonais (3B), anuais (3C) e os Box-plots anuais (3D) da evapotranspiração de referência, estimadas pelos métodos de Penman-Monteith-FAO (ET_0PM) e Tanque Classe A (ET_0TCA), este último aplicando-se diferentes coeficientes do tanque propostos por Snyder (ET_0TCA_S), Allen et al., (ET_0TCA_A), Cuenca (ET_0TCA_C) e Pereira et al., (ET_0TCA_P), para Campina Grande, PB, no período de 2000 a 2016.

As dispersões das médias diárias mensais dos valores de ET_0 , obtidas para cada método, são verificadas na Figura 4. Essas dispersões (variabilidades) oscilam em torno do valor médio encontradas através dos desvios padrão. A partir desses resultados verificou-se que a menor

dispersão foi para a ET_0PM , entre 0,14 mm (Março) e 0,31mm (Janeiro), quando se compara com a ET_0TCA , independente do K_p adotado para obtenção da ET_0TCA . Por exemplo, ET_0TCA_Snyder obteve as maiores dispersões, variando de 0,93mm (Janeiro) e 0,45mm (Julho).

Figura 4. Variabilidades das médias diárias mensais (Desvio Padrão) da Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith-FAO (ET_0PM) e Tanque Classe A (utilizando-se diferentes coeficientes de ajustes- K_p), para Campina Grande, PB, no período de 2000 a 2016.

O coeficiente de variação (CV), observado na Tabela 2, que é uma relação entre desvio padrão (apresentado na Figura 4) e a média (apresentada na Figura 3A), em termos percentuais, foi menor para a ET₀PM, com um CV de 3,7% (Março) a 9,1% (Maio). Destaca-se, entretanto, que os maiores CV's foram para a ET₀TCA_Allen, e,

portanto, o que apresentou, proporcionalmente, o maior desvio em torno da média, cujo CV médio foi de 24,8%. A variabilidade nos valores da ET₀TCA, comparada a ET₀PM, foi sempre maior, independente da escala temporal (diária, mensal, sazonal e anual) e do coeficiente de ajuste adotado para a conversão da evaporação em ET₀ pelo TCA.

Tabela 2. Coeficientes de Variação (CV, em %) da evapotranspiração de referência média diária mensal quando obtidos pelos métodos de Penman-Monteith (ET₀PM) e Tanque Classe A (ET₀TCA), este último aplicando-se coeficientes do tanque propostos por Snyder (ET₀TCA_S), Allen et al., (ET₀TCA_A), Cuenca (ET₀TCA_C) e Pereira et al., (ET₀TCA_P), para Campina Grande, PB, no período de 2000 a 2016.

	ET ₀ PM	ET ₀ TCA_S	ET ₀ TCA_C	ET ₀ TCA_P	ET ₀ TCA_A
Jan	7,9	21,6	21,5	17,0	29,5
Fev	6,3	18,3	18,2	14,2	24,8
Mar	3,7	16,2	15,9	12,8	21,4
Abr	6,7	19,6	19,8	15,6	26,6
Mai	9,1	26,2	26,3	20,7	35,0
Jun	7,7	23,1	22,9	17,7	30,0
Jul	7,2	20,0	20,2	16,3	26,8
Ago	6,4	20,8	21,0	17,4	28,7
Set	6,3	14,8	14,9	12,7	20,9
Out	4,9	12,3	12,4	10,4	17,6
Nov	4,4	11,7	11,6	9,4	16,4
Dez	4,2	14,6	14,5	11,6	20,1

As análises dos dados médios diários de ET₀, estimados pelo método ET₀PM-FAO e ET₀TCA, apresentadas nas Figuras 3 e 4, permitem identificar uma característica importante, em que os valores médios da ET₀TCA se aproximaram muito da ET₀PM no período da estação mais chuvosa (outono-inverno), quando se utiliza o K_p de Snyder, diferentemente foi identificado no período de estiagem (primavera-verão), cujo método em destaque foi melhor ao se calcular a ET₀TCA utilizando o K_p sugerido por Cuenca, para conversão da evaporação em ET₀TCA.

Isso demonstra, portanto, que o valor da ET₀ estimada pelo método do Tanque Classe A, não depende somente do valor da evaporação do Tanque, mas do coeficiente utilizado para converter evaporação em ET₀ e à época do ano.

Sendo assim, os maiores e os menores valores sazonais da ET₀ (Figura 3B) se devem não somente por coincidir com a primavera-verão e o

inverno, respectivamente, mas também, por coincidirem com as estações menos e mais chuvosas, para Campina Grande, PB, de acordo com os estudos sobre precipitação para esta localidade encontrados por Macêdo et al. (2011), Almeida e Cabral Júnior (2014) e Pereira et al. (2016).

Análise de correlação com a respectiva significância estatística, entre as estimativas, foram aplicadas e constam na Figura 5, pela matriz de correlações, das médias diárias anuais, entre a ET₀TCA e a ET₀PM-Padrão. Observa-se que todas as correlações entre as variáveis explicativas e a ET₀PM foram significativas a 1% (valor-p < 0,01). A maior correlação da ET₀PM com a ET₀TCA ocorreu ao se utilizar o K_p proposto por Allen et al. (ET₀TCA_A) com r = 0,72, por outro lado a menor correlação foi identificada ao utilizar o K_p sugerido por Snyder (ET₀TCA_S), r = 0,68.

Matriz de dispersão com as respectivas correlações

Figura 5. Matriz de dispersão média diária entre a ET₀TCA (utilizando-se diferentes Kp's) e a ET₀PM-FAO (mm/dia/ano) com as respectivas correlações (r) e valores-p em Campina Grande, PB. Período: 2000 a 2016.

Na Tabela 3, nota-se que os índices de concordância (d) foram relativamente mais baixos que as correlações (r) e variaram em função da equação do coeficiente (Kp) escolhido e da sazonalidade (estação do ano). Assim sendo, o modelo da ET₀TCA usando o Kp proposto por Allen et al., no verão e outono, destacou-se por obter os maiores índices de correlação ($r = 0,74$ e $0,88$) e concordância ($d = 0,58$ e $0,65$), no entanto o índice de classificação (c) foi inferior a 0,60 o que classificou o referido modelo com desempenho sofrível e mediano, respectivamente.

O modelo da ET₀TCA com maior índice de concordância ($d = 0,71$) e de desempenho mediano ($c = 0,58$), ocorreu no período da primavera, ao utilizar-se Kp proposto por Cuenca (1989), ressalta-se ainda que esse foi o modelo com os menores erros médios e quadráticos com valores respectivos de 0,29 (EMA) e 0,33 (RMSE).

Para o período anual e na estação do verão os índices de desempenho foram os piores e

ficaram com valor de "c" < 0,45, esse valor representa, de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) classificações de desempenho variando de sofrível a péssimo.

Os resultados apresentados na Tabela 3 foram semelhantes aos resultados encontrados por Oliveira et al. (2010) que comparando a ET₀TCA com a ET₀PM-FAO, no Norte da Bahia, afirmaram que o tanque classe A, embora muito utilizado no manejo da irrigação, mostrou desempenho no máximo apenas como mediano, com coeficiente "c" < 0,70. Esses resultados corroboram também com Sousa et al. (2010) que ao analisarem a estimativa da ET₀ pelo método do Tanque Classe "A" não identificaram desempenho satisfatório em nenhum perímetro irrigado estudado do estado de Sergipe. Cabral Júnior et al. (2017) estão em consonância com esses resultados ao afirmarem que o método do Tanque Classe A também não apresentou boa eficiência para perímetros irrigados em Juazeiro (BA) e Petrolina (PE).

Tabela 3. Índices estatísticos propostos por Willmott et al. (1985) e índices do desempenho dos métodos de estimativa da ET₀TCA (estimada por diferentes coeficientes de ajustes) comparada a ET₀PM, sazonal e anualmente, no período de 2000 a 2016, em Campina Grande, PB.

Métodos	Verão						
	d	EMA	EMAX	RMSE	r	c	Classificação
ET ₀ TCA_S	0,55	0,62	1,47	0,78	0,71	0,39	Mau
ET ₀ TCA_A	0,58	0,40	1,08	0,54	0,74	0,43	Sofrível
ET ₀ TCA_C	0,58	0,36	0,94	0,47	0,73	0,42	Sofrível
ET ₀ TCA_P	0,52	0,71	1,17	0,77	0,73	0,38	Mau

Métodos	Outono						
	d	EMA	EMAX	RMSE	r	c	Classificação
ET ₀ TCA_S	0,65	0,31	0,73	0,37	0,86	0,56	Mediano
ET ₀ TCA_A	0,65	0,36	0,41	0,41	0,88	0,57	Mediano
ET ₀ TCA_C	0,64	0,40	0,75	0,44	0,87	0,56	Mediano
ET ₀ TCA_P	0,41	0,93	1,30	0,95	0,85	0,35	Mau

Métodos	Inverno						
	d	EMA	EMAX	RMSE	r	c	Classificação
ET ₀ TCA_S	0,65	0,31	0,56	0,36	0,81	0,53	Mediano
ET ₀ TCA_A	0,62	0,42	0,75	0,49	0,83	0,52	Mediano
ET ₀ TCA_C	0,60	0,45	0,79	0,52	0,83	0,50	Sofrível
ET ₀ TCA_P	0,39	0,91	1,17	0,94	0,84	0,33	Mau

Métodos	Primavera						
	d	EMA	EMAX	RMSE	r	c	Classificação
ET ₀ TCA_S	0,60	0,52	1,00	0,62	0,79	0,47	Sofrível
ET ₀ TCA_A	0,68	0,34	0,67	0,40	0,82	0,56	Mediano
ET ₀ TCA_C	0,71	0,29	0,54	0,33	0,81	0,58	Mediano
ET ₀ TCA_P	0,45	0,86	1,16	0,89	0,82	0,37	Mau

Métodos	Anual						
	d	EMA	EMAX	RMSE	r	c	Classificação
ET ₀ TCA_S	0,58	0,30	0,60	0,36	0,68	0,39	Mau
ET ₀ TCA_A	0,60	0,21	0,49	0,24	0,72	0,43	Sofrível
ET ₀ TCA_C	0,59	0,20	0,56	0,26	0,70	0,41	Sofrível
ET ₀ TCA_P	0,32	0,85	1,19	0,87	0,70	0,22	Péssimo

d = índice de concordância; EMA = erro médio absoluto; EMAX = erro máximo; r = coeficiente de correlação; RMSE = quadrado médio do desvio; c = índice de desempenho.

Os resultados encontrados por Pereira et al. (2014), para Pernambuco, demonstraram que o método da ET₀TCA utilizando o Kp proposto por Allen et al., foi o método que apresentou melhor

resultado das culturas analisadas na área de estudo, entre os métodos comparados.

Outros resultados obtidos por estudos de Braga et al. (2008), que analisaram a ET₀TCA no

vale do submédio do rio São Francisco, encontraram baixo desempenho pelo Kp de Snyder, e não o indicaram para a região. Esse resultado diverge, por parte, com os resultados encontrados por Sabziparvar et al. (2010), que recomendaram o Kp de Snyder para estimativa da ET_0 TCA, para climas áridos e quentes. A partir dessas discussões pode-se afirmar a importância de se realizar esses estudos em condições geográficas e climáticas específicas. Cunha et al. (2013) acrescentam, neste sentido, que até mesmo numa localidade o melhor Kp pode ser diferenciado, a depender das condições de tempo. Isso pôde ter sido evidenciado para Campina Grande, em que mesmo os maiores índices alcançaram apenas desempenho mediano, por estação do ano, nem sempre foi para o mesmo método do Kp.

Sugere-se neste trabalho que outros estudos sejam realizados para analisar a eficácia da estimativa da ET_0 pelo método do TCA, pois nem todos os trabalhos que fizeram essas análises concordam ou divergem quanto ao desempenho e o Kp para melhor conversão da evaporação do tanque em ET_0 .

Conclusões

De acordo com os resultados, conclui-se que:

1. Os valores médios diários da ET_0 foram maiores no período de meados de primavera e no verão e a variabilidade da ET_0 PM-FAO foi menor que a da ET_0 TCA;
2. O coeficiente do Tanque Classe A, proposto por Pereira et al. (1995), foi o que apresentou maior desvio em relação a ET_0 PM, com subestimativa de 18,8% (dezembro) a 58,1% (julho);
3. Os índices de desempenho da ET_0 TCA (independente do Kp utilizado) comparados a ET_0 PM-FAO alcançaram desempenho máximo apenas como mediano;
4. Nesse contexto, para Campina Grande, foi identificado através dos índices de Wilmott et al. (1985) que a estimativa da ET_0 pelo TCA não alcançou desempenho considerado bom (" c " > 0,70), portanto não é um método recomendado para a localidade.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a CAPES pela concessão de bolsa de Doutorado (com vigência de 2015-2019), que foi fundamental para realização desta pesquisa. Os três autores expressam gratidão, em memória, ao Dr. Napoleão Esberard de Macêdo Beltrão, ex-diretor geral da EMBRAPA

Algodão/Campina Grande, PB, pelo apoio e incentivo a este trabalho e a pesquisa agrícola nacional. Externamos ainda nossa apreciação pelas sugestões dadas pela equipe de avaliadores da Revista Brasileira de Geografia Física (RBGF).

Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 301 p.
- Allen, R.G.; Jensen, M.E.; Wright, J.L., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n.4, p. 650-662.
- Almeida, H. A., Cabral Júnior, J. B., 2014. Variabilidades Sazonais e Interdecadais da Chuva nas Microrregiões Geográficas do Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 07, n. 5, 846-858.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L. M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, p.711 728.
- Bernardo, S., Soares, A., Mantovani, E. C., 2005. Manual de Irrigação. 7ª ed. Viçosa – MG.
- Braga, M. B., Calgare, M., Moura, M. S. B., Silva, T. G. F., 2008. Coeficientes do tanque classe "A" para estimativa da evapotranspiração de referência na região do Vale do Submédio São Francisco, estado da Bahia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 16, 49-57.
- Cabral Júnior, J. B.; Bezerra, B. G. 2018. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, 4, p. 71-89.
- Cabral Júnior, J.B., Silva, C.M.S., Almeida, H.A., 2017. Comparação mensal, sazonal e anual de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência para Juazeiro-BA e Petrolina-PE. *Revista de Geociências do Nordeste* 3, 23-42.
- Cabral Júnior, J.B., Almeida, H.A., Silva, C.M.S., 2013. Análise Comparativa da Temperatura Média do Ar em Campina Grande, PB, Obtida pelo Método dos Extremos e pelo Método

- Padrão. Revista Brasileira de Geografia Física, 6, p. 888-902.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97.
- Costa, R. L., Dos Santos Silva, F. D., Sarmanho, G. F., Lucio, P. S., 2012. Imputação Multivariada de Dados Diários de Precipitação e Análise de Índices de Extremos Climáticos. Revista Brasileira de Geografia Física 5, 661-675.
- Cuenca, R.H., 1989. Irrigation system design: an engineering approach. New Jersey: Prentice-Hall.
- Cunha, A. R., 2011. Coeficiente do tanque Classe A obtido por diferentes métodos em ambiente protegido e no campo. Semina: Ciências Agrárias 32, 451-464.
- Cunha, P. C. R., Nascimento, J. L., Silveira, P. M., Alves Júnior, J., 2013. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. Pesquisa Agropecuária Tropical 43, 114-122.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. 1ª ed., Rome: FAO.
- Draper, N. R., Smith, R., 1996. Applied regression analysis. 3 ed. New York: Wiley.
- Gundekar, H.G., Khodke, U.M., Sarkar, S., Rai, R.K., 2008. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science 26, 169-175.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em 15/09/2018.
- Irmak, S., Haman, D., Jones, J., 2002. Evaluation of Class A Pan Coefficients for Estimating Reference Evapotranspiration in Humid Location. Journal of irrigation and Drainage Engineering 128, 153-159.
- Köppen, W. Climatología., 1948 Buenos Aires, Fondo de Cultura. p. 152-192.
- Macedo, M. J. H., Guedes, R. V. S., Sousa, F. A. S., 2011. Monitoramento e intensidade das secas e chuvas na cidade de Campina Grande/PB. Revista Brasileira de Climatologia, 8, 105-117.
- Medeiros, A. T., 2002. Estimativa da Evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Montheith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba, CE. Tese (Doutorado). Piracicaba, SP, ESALQ-USP.
- Mendonça, J. C., Sousa, E. F., Andre, R. G. B., Bernardo, S., 2006. Coeficientes do tanque classe “A” para a estimativa da evapotranspiração de referência, em Campos dos Goytacazes, RJ. Revista Brasileira de Agrometeorologia 14, 123-128.
- MI - Ministério da Integração Nacional, 2017. Resolução nº 115, 23/ 11/ 2017. Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL nº 107, de 27 de julho de 2017. Brasília. Disponível em: sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/resolucao115-23112017-delimitacaodosemiarido-DOU.pdf. Acesso em: 01/2018.
- Oliveira, G. M., Leitão, M.M.V.B.R., Bispo, R. C., Santos, I.M.S., Almeida, A.C., 2010. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região norte da Bahia. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza 4, 104-109.
- Peixoto, T. D. C., Levien, S.L.A., Bezerra, A.H.F., Sobrinho, J.E., 2014. Avaliação de diferentes metodologias de estimativa da ET₀ baseadas no tanque classe a, em Mossoró, RN. Revista Caatinga 27, 58-65.
- Pereira, A. R.; Sedyama, G. C.; Villa Nova, N. A. 2013. Evapotranspiração. Campinas: Fundag, p. 323.
- Pereira, A. R., Nova, N. A. V., Pereira, A. S., Barbieri, V., 1995. A model for class-A pan coefficient. Agricultural and Forest Meteorology 76, 75-82.
- Pereira, P. A., Cavalcante, J. S. I., Souza, W. M., Galvêncio, J. D., 2016. Climate change and

- rainfall variability in the city of Campina Grande-PB: analysis from historical series of precipitation. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6, 130-138.
- Pereira, P. C., SILVA, T. G. F., SILVA, S. M. S., Cruz Neto, J. F.; MORAIS, J. E. F. 2014. Avaliação e aplicabilidade do coeficiente do Tanque Classe “A” no médio Pajeú, Pernambuco. *Revista Caatinga*, 27, 131-140.
- Sabziparvar, A. A.; Tabari, H.; Aeini, A.; Ghafouri, M. 2010. Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates. *Water resources management*, 24, 909-920.
- Santos, A. T. S.; Silva, C. M. S., 2013. Seasonality, interannual variability, and linear tendency of wind speeds in the Northeast Brazil from 1986 to 2011. *The Scientific World Journal*, 2013, p. 1-11.
- Smith, M., 1991. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements: ROME:FAO, 54 p.
- Snyder, R.L., 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering* 118, 977-980.
- Sousa, I. F., Silva, V.P.R., Sabino, F.G., Netto, A.O.A., Silva, B.K.N., Azevedo, P.V., 2010. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 633-644.
- Souza, L. P., Farias, O. S., Moreira, J. G. V., Gomes, F.A., Frade Junior, E. F., 2011. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Cruzeiro do Sul – Acre. *ENCICLOPEDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer 7, 1-8, 2011.
- Spiegel, M. R. 1972. *Estatística*. 1 ed., McGraw-Hill, São Paulo-SP.
- Stanhill, G., 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112, 233-236, 2002.
- Van Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn, K., 2011. MICE: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software* 45, 1-67.
- Willmott, C.J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'donnell, J., Rowe, C. M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research Oceans* 90, 8995-9005.