

Estimativa da evapotranspiração de referência com dados climáticos limitados no estado do Piauí

Estimate reference evapotranspiration with estimated climatic data in the state of Piauí

Clescy Oliveira da SILVA 1; Aderson Soares de ANDRADE JUNIOR 2; Valdemício Ferreira SOUSA 3; Valdenir Queiroz RIBEIRO 4; Paulo César SENTELHA 5

Recibido: 07/04/16 • Aprobado: 12/05/2016

Conteúdo

1. Introdução
2. Material e métodos
3. Resultados e discussão
4. Conclusões

Referências

RESUMO:

O trabalho avaliou o desempenho do modelo Penman-Monteith (PM-FAO) de estimativa da evapotranspiração potencial (ET_o), com dados climáticos ausentes estimados. O método PM-FAO, com variáveis medidas foi comparado com sete situações onde há a ausência de dados para cálculo de ET_o, estimando-se valores de velocidade média do vento, pressão parcial de vapor, radiação solar e combinando duas ou mais destas variáveis estimadas. O desempenho dos métodos foi analisado por meio de coeficiente de correlação de Pearson; índice de concordância de Willmott; e índice de confiança ou desempenho. A ET_o com dados estimados de velocidade do vento apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: Penman-Monteith 56-FAO. Dados estimados. Índice de confiança.

ABSTRACT:

The study evaluated the performance of the Penman-Monteith model (PM-FAO) estimate the potential evapotranspiration (ET_o), with estimated missing weather data. The PM-FAO method, the measured variables were compared with seven situations where there is no data to calculate ET_o estimating mean velocity values of wind, partial pressure of steam, solar radiation and combining two or more of these estimated variables. The performance of the methods was analyzed using Pearson's correlation coefficient; Willmott agreement index; and confidence index or performance. The ET_o with estimated data of wind speed showed better performance.

Keywords: Penman-Monteith 56-FAO. Estimate Data. Confidence Index

1. Introdução

As regiões de clima semiárido são caracterizadas por grande déficit hídrico, em consequência das chuvas irregulares no tempo e espaço e altas taxas de evapotranspiração. No semiárido do Nordeste brasileiro, a escassez de água é muito maior que no restante do país. Por isso, o uso da tecnologia de irrigação, desde que executada de forma racional e eficiente, se faz necessário para

possibilitar a produção de alimentos. Tagliaferre et al. (2012) ressalta que para áreas com características climáticas de semiaridez, a quantificação da evapotranspiração assume particular importância, em virtude aos déficits hídricos que ocorre ao longo do ano, constituindo uma limitação à produção agrícola. Para um manejo da irrigação adequado e eficiente é fundamental o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o) local, na escala diária, preferencialmente por meio do método de Penman-Monteith/56 (PM-FAO), o qual requer um elevado número de variáveis climatológicas para sua estimativa.

O método de Penman-Monteith é adotado pela FAO (Food and Agriculture Organization) como padrão por ser considerado o mais apropriado para a estimativa da evapotranspiração de referência (Allen et al., 1998). O método vem sendo aplicado nas mais diversas regiões no mundo com desempenho satisfatório (López-Urrea et al. 2006, Vila Nova 2006, Jabulon & Sahli 2008, Barros et al. 2009).

Carvalho et al. (2011) afirmam que quando há disponibilidade de dados para aplicação do método PM-FAO, este deve ser o recomendado como padrão, tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Porém, o modelo de PM-FAO necessita de um número grande de variáveis climáticas, além de variáveis físicas e biológicas, e nem sempre os serviços meteorológicos dispõem de todos os dados nas estações automáticas e convencionais, seja por falha nos sensores de umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, ou ausência dos mesmos. Na impossibilidade da aplicação do modelo PM-FAO, se faz necessário buscar alternativas para estimar as variáveis ausentes.

Segundo Figueredo Júnior, Araújo e Andrade Júnior (2011), os métodos que empregam apenas a temperatura do ar podem limitar a representatividade das condições climáticas para efeito da estimativa da ET_o, pois com os mesmos valores de temperatura do ar, a demanda hídrica da atmosfera poderá ser diferente, dependendo das condições de irradiância solar, umidade do ar e velocidade do vento. Carvalho et al. (2011) observaram que o método alternativo de estimativa de ET_o, onde se utilizou apenas dados de temperaturas máximas e mínimas, tende a superestimar o método padrão. No entanto, recomendam o método para manejo de irrigação nas localidades quando nem todos os dados de entrada necessários para FAO-PM estão disponíveis. Popova, Kercheva e Pereira (2006) analisaram os métodos de estimativa de evapotranspiração de referência, seguindo metodologia proposto pela FAO quando se tem ausência de variáveis meteorológicas, sob diferentes condições para a região sul da Bulgária. Foram utilizadas cinco localidades, num período de 1976 a 1991. Os autores concluíram que os procedimentos propostos pela FAO, principalmente para a estimativa de radiação solar, baseado em valores de temperaturas máxima e mínima, bem como de umidade relativa do ar, estimada com base na temperatura mínima, produziu estimativas mais precisas da ET_o para a região em comparação ao método de Hargreaves, que tende a superestimar a ET_o.

Sentelhas, Gillespie e Santos (2010), utilizando dados de umidade relativa do ar (UR) e de velocidade do vento (U) estimados, observaram que o método PM-FAO ainda foi uma opção muito boa para estimar ET_o para o sul de Ontário, Canadá. Para esses casos, os dados de U foram substituídos por valores normais para a região e o déficit de pressão de vapor (Δe) foi estimado a partir dos dados de temperatura. O método de Priestley-Taylor também foi uma boa opção para estimar ET_o quando faltavam dados de U e Δe , principalmente quando os mesmos são calibrados para o local de interesse (RMSE = 0,40 mm dia⁻¹). Quando estimou dados de saldo de radiação solar (R_n), o método PM-FAO não foi bom o suficiente para estimar a ET_o, com RMSE aumentando para 0,79 mm dia⁻¹.

Levando-se em consideração a necessidade de se preencher falhas em séries históricas e se ter um manejo de irrigação sustentável na região, este estudo teve como objetivo avaliar o método PM-FAO, com ausência de dados medidos de radiação solar (PM-RS), velocidade do vento (PM-U) e pressão de vapor atual (PM-ea), comparando-os ao PM-FAO padrão, para alguns municípios do Estado do Piauí.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado para alguns municípios do Estado do Piauí, que se encontra compreendido entre as latitudes 2°44'49"S e 10°55'05"S; longitudes 40°22'12"W e 45°59'42"W, pertencente à região Nordeste do país. O banco de dados foi cedido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para 19 estações meteorológicas automáticas localizadas no Estado. O período de coleta foi de janeiro de 2008 a dezembro de 2011, em escala diária. As variáveis climáticas utilizadas para análise foram: radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

O período em análise foi dividido em: período anual (todos os meses do ano), seco (meses de maio a novembro) e chuvoso (meses de dezembro a abril). Na Tabela 1 são apresentadas as estações, os municípios onde estão localizadas, localização geográfica e números de dados utilizados no estudo.

Tabela 1. Código, municípios, coordenadas geográficas, período de anos e número de dias por ano com dados climáticos nas estações meteorológicas do Piauí utilizados no estudo.

Código	Estação	Coordenadas Geográficas			Período	ND
		Lat	Long	Alt		
A336	Alvorada do Gurguéia	-8.44°	-43.86°	270.0	2008-2011	1156
A326	Bom Jesus	-9.08°	-44.33°	297.0	2008-2011	1025
A365	Canto do Buriti	-8.12°	-42.97°	308.0	2010-2011	334
A337	Caracol	-9.29°	-43.32°	100.0	2008-2011	972
A361	Castelo do Piauí	-5.35°	-41.51°	286.0	2009-2010	309
A338	Esperantina	-3.90°	-42.26°	65.0	2008-2011	868
A311	Floriano	-6.77°	-43.02°	123.3	2008-2011	1110
A364	Gilbués	-9.87°	-45.35°	425.0	2010-2011	396
A354	Oeiras	-6.97°	-42.15°	156.0	2008-2011	960
A308	Parnaíba	-3.07°	-41.78°	57.0	2008-2011	930
A330	Paulistana	-8.13°	-41.14°	374.0	2008-2011	1140
A343	Picos	-7.07°	-41.40°	233.0	2008-2011	622
A335	Piripiri	-4.28°	-41.79°	161.0	2008-2010	997
A331	São João do Piauí	-8.36°	-42.25°	235.0	2008-2011	1103
A362	São Pedro do Piauí	-5.91°	-42.72°	287.0	2009-2011	2414
A345	São Raimundo Nonato	-9.03°	-42.70°	402.0	2009-2011	702
A312	Teresina	-5.03°	-42.80°	74.0	2008-2011	1018
A346	Uruçuí	-7.47°	-44.34°	393.0	2008-2011	1157
A363	Valença do Piauí	-6.40°	-41.74°	301.0	2009-2011	919

ND – número de dias avaliados

Fonte: Os autores

A ETo foi estimada pelo método Penman-Monteith/FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_o : evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n : saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G : fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T : temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); U_2 : velocidade do vento à altura de 2 m (m s^{-1}); e_s : pressão de saturação do ar (kPa); e_a : pressão de vapor atual do ar (kPa); $(e_s - e_a)$: déficit de pressão de vapor (kPa); Δ : declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ : constante psicrométrica ($0,0677 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os valores de ET_o , com dados meteorológicos limitados, foram gerados utilizando o método PM-FAO com valores estimados de radiação solar líquida (R_n), velocidade do vento (U) e pressão parcial de vapor (e_a), compondo ao todo sete situações onde não se dispõe de uma das variáveis (PM_{RS} , PM_U e PM_{e_a}), combinando duas faltantes (PM_{U-e_a} , PM_{U-RS} , PM_{e_a-RS}) e quando não existem as três variáveis (PM_{U-e_a-RS}). Na primeira situação, denominada de PM_{RS} , temos o método de PM-FAO com a radiação solar líquida (R_n) estimada pelo saldo de radiação entre ondas curtas e longas apenas da radiação solar. O saldo ou balanço de radiação líquida disponível pode ser estimado utilizando as equações 2, 3, e 4 (Allen et al. 1998), com RS calculado pela equação 6, quando não se tem a referida variável medida.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

$$R_{ns} = 0,60RS \quad \text{para o período chuvoso} \quad (3)$$

$$R_{ns} = 0,50RS \quad \text{para o período seco} \quad (4)$$

$$R_{nl} = \left[\sigma \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{RS}{RS_o} - 0,35 \right) \right] \quad (5)$$

em que: R_{ns} : saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} : saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ : constante de Stefan-Boltzman ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{\max} : temperatura máxima (K); T_{\min} : temperatura mínima (K); RS : radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); RS_o : radiação solar global horária em ausência de nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_a : radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

$$RS = K_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (6)$$

em que: K_{RS} : coeficiente de ajuste da radiação solar (condição = 0,16 para condição continental e 0,19 para condição costeira).

Na segunda situação, denominada de PM_U , os valores de ET_o foram calculados por PM-FAO com os dados de velocidade do vento estimados. A velocidade do vento a 2 m (U_2) foi utilizado

um valor único retirado da média da velocidade do vento medida em todas as estações em estudo. A terceira situação, denominada de PM-ea, utilizou a estimativa da pressão parcial de vapor no método de PM-FAO, quando não há dados de umidade. Para estimar ea, considerou que a temperatura do ponto de orvalho (T_d) é bem próxima da temperatura mínima diária (T_{min}) em °C. Logo a pressão de vapor atual (e_a), em kPa, foi determinada por:

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

As três situações que foram geradas pela combinação de duas variáveis ausentes foram denominadas de PM_{U-ea} , PM_{U-RS} , PM_{ea-RS} , e a última situação foi denominada de $PM_{U-ea-RS}$, quando não há as três variáveis.

Estimou-se o grau de diferença entre o método PM-FAO padrão (com todos os dados medidos) e PM-FAO nas sete situações de dados faltantes estimados, mencionados anteriormente, utilizando-se os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (r) de Pearson (SAS INSTITUTE Inc, 1989); índice de exatidão ou concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 1985); e coeficiente de confiança de Camargo & Sentelhas (1997).

O índice de concordância ou exatidão de Willmott varia de $-\infty$ a 1 (equação 8). A perfeita concordância ocorre quando "d" for igual a 1.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Ye - Y)^2}{\sum (|Ye - \bar{Y}| + |Y - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (8)$$

em que: Ye : valores de ETo estimados pelos métodos não padrão (mm dia^{-1}); Y : valores de ETo estimados pelo método padrão (mm dia^{-1}) e \bar{Y} : valores médios total do período em que ETo foi estimado pelo método padrão (mm dia^{-1}).

Com base na proposta de Camargo & Sentelhas (1997), calculou-se o coeficiente de desempenho ou de confiança, da seguinte forma:

$$c: r \times d \quad (9)$$

em que: c é coeficiente de desempenho ou de confiança; r : correlação e d : índice de Willmott.

O índice "c" por integrar os índices de precisão (r) e de exatidão (d), permite classificar o desempenho das estimativas conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos coeficientes de desempenho ou de confiança (c) e suas respectivas classificações, segundo Camargo & Sentelhas (1997).

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível

0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

3. Resultados e discussão

Os valores médios de ETo foram diferentes nos períodos analisados (anual, seco e chuvoso) (Tabela 3). Existe uma sazonalidade nos valores de ETo, mostrando-se maiores no período seco e menores no período chuvoso, em resposta a maior e menor incidência de radiação solar. Em todas as situações analisadas os valores médios de ETo subestimaram os valores do método PM-FAO padrão. Resultado semelhante foi encontrado por Carvalho et al. (2015), para o método que estimou a pressão de vapor.

A estação de Paulistana (A330) foi a que apresentou maiores valores de ETo com $4,31 \pm 1,24$ mm, no período anual, $4,70 \pm 1,17$ mm no período seco e $4,83 \pm 1,15$ mm, no período chuvoso, resultado da combinação de altos valores de radiação solar, velocidade do vento, e baixa umidade relativa do ar medidos no local. Na maioria das estações localizadas nos municípios pertencentes ao semiárido piauiense (Canto do Buriti, Castelo do Piauí, Oeiras, Paulistana, Picos, São João do Piauí e São Raimundo Nonato) foram observados maiores valores de ETo, característica da própria região.

Tabela 3. Médias e desvio-padrão das estimativas de evapotranspiração de referência (ETo) calculadas por diferentes situações aplicadas ao método de PM-FAO, para estações meteorológicas do Piauí, nos períodos anual, seco e chuvoso.

Código	ETo e Desvio Padrão (mm.dia ⁻¹)							
	PM-FAO	PM-U	PM-ea	PM-RS	PM-U -ea	PM-U -RS	PM-ea -RS	PM-U -ea -RS
Anual								
A308	3,11 ± 0,91	2,86 ± 0,62	2,33 ± 0,48	1,26 ± 0,62	2,40 ± 0,54	0,91 ± 0,22	0,48 ± 0,18	0,46 ± 0,19
A311	3,08 ± 0,85	3,21 ± 0,70	2,59 ± 0,60	1,10 ± 0,63	2,54 ± 0,59	1,30 ± 0,35	0,61 ± 0,21	0,62 ± 0,21
A312	2,83 ± 0,60	3,04 ± 0,61	2,56 ± 0,52	0,75 ± 0,35	2,51 ± 0,51	1,05 ± 0,31	0,49 ± 0,24	0,51 ± 0,23
A326	3,21 ± 1,01	3,14 ± 0,76	2,54 ± 0,62	1,20 ± 0,80	2,52 ± 0,62	1,16 ± 0,41	0,54 ± 0,27	0,54 ± 0,26
A330	4,31 ± 1,24	3,48 ± 0,77	2,67 ± 0,70	2,11 ± 1,02	2,76 ± 0,72	1,21 ± 0,34	0,54 ± 0,24	0,49 ± 0,26
A331	3,6 ± 0,96	3,48 ± 0,76	2,79 ± 0,70	1,36 ± 0,69	2,78 ± 0,69	1,25 ± 0,35	0,56 ± 0,24	0,55 ± 0,25
A336	3,36 ± 0,92	3,27 ± 0,75	2,65 ± 0,68	1,11 ± 0,62	2,65 ± 0,69	1,04 ± 0,34	0,41 ± 0,25	0,41 ± 0,25
A346	2,85 ± 0,81	3,04 ± 0,73	2,51 ± 0,65	0,82 ± 0,48	2,47 ± 0,63	1,08 ± 0,28	0,50 ± 0,23	0,52 ± 0,23
A362	2,89 ± 0,60	2,91 ± 0,59	2,49 ± 0,55	0,91 ± 0,26	2,47 ± 0,54	0,98 ± 0,22	0,52 ± 0,18	0,53 ± 0,18
Seco								
A308	3,09 ± 0,93	2,78 ± 0,55	2,21 ± 0,39	1,25 ± 0,69	2,28 ± 0,46	0,84 ± 0,20	0,37 ± 0,14	0,34 ± 0,13
A311	3,28 ± 0,94	3,35 ± 0,69	2,53 ± 0,55	1,32 ± 0,73	2,52 ± 0,55	1,41 ± 0,39	0,57 ± 0,23	0,58 ± 0,24
A312	2,78 ± 0,60	3,02 ± 0,61	2,46 ± 0,46	0,74 ± 0,39	2,42 ± 0,46	1,05 ± 0,36	0,42 ± 0,25	0,45 ± 0,24
A326	3,34 ± 1,08	3,20 ± 0,72	2,46 ± 0,56	1,38 ± 0,89	2,46 ± 0,57	1,24 ± 0,44	0,50 ± 0,29	0,50 ± 0,28
A330	4,70 ± 1,17	3,57 ± 0,69	2,91 ± 0,63	1,54 ± 0,94	2,95 ± 0,66	1,22 ± 0,32	0,62 ± 0,22	0,60 ± 0,25
A331	3,83 ± 0,99	3,49 ± 0,66	2,62 ± 0,59	1,68 ± 0,73	2,65 ± 0,61	1,29 ± 0,35	0,47 ± 0,24	0,45 ± 0,25
A336	3,46 ± 0,96	3,27 ± 0,68	2,50 ± 0,57	1,30 ± 0,71	2,52 ± 0,59	1,10 ± 0,38	0,35 ± 0,27	0,34 ± 0,26
A346	2,93 ± 0,84	3,11 ± 0,67	2,44 ± 0,54	0,94 ± 0,56	2,41 ± 0,55	1,14 ± 0,32	0,42 ± 0,23	0,44 ± 0,23
A362	2,83 ± 0,62	2,87 ± 0,59	2,28 ± 0,47	0,99 ± 0,32	2,28 ± 0,47	1,03 ± 0,26	0,44 ± 0,18	0,45 ± 0,18
Chuvoso								
A308	3,13 ± 0,89	2,95 ± 0,67	2,46 ± 0,53	1,27 ± 0,53	2,53 ± 0,59	1,00 ± 0,22	0,60 ± 0,15	0,58 ± 0,16
A311	2,81 ± 0,63	3,04 ± 0,68	2,67 ± 0,65	0,80 ± 0,21	2,58 ± 0,63	1,14 ± 0,20	0,66 ± 0,15	0,68 ± 0,14
A312	2,92 ± 0,58	3,09 ± 0,61	2,76 ± 0,57	1,59 ± 0,23	2,67 ± 0,55	1,05 ± 0,22	0,61 ± 0,16	0,63 ± 0,16
A326	2,93 ± 0,79	3,02 ± 0,81	2,71 ± 0,72	0,83 ± 0,34	2,65 ± 0,71	1,01 ± 0,26	0,62 ± 0,19	0,64 ± 0,18
A330	3,83 ± 1,15	3,57 ± 0,85	2,91 ± 0,72	1,54 ± 0,78	2,95 ± 0,75	1,22 ± 0,36	0,62 ± 0,23	0,60 ± 0,23
A331	3,33 ± 0,86	3,47 ± 0,86	3,00 ± 0,75	0,99 ± 0,40	2,94 ± 0,75	1,20 ± 0,33	0,65 ± 0,19	0,67 ± 0,19
A336	3,22 ± 0,85	3,27 ± 0,83	2,87 ± 0,77	0,85 ± 0,30	2,83 ± 0,77	0,94 ± 0,24	0,50 ± 0,20	0,50 ± 0,20
A346	2,73 ± 0,74	2,93 ± 0,79	2,68 ± 0,74	0,66 ± 0,25	2,56 ± 0,72	1,00 ± 0,18	0,60 ± 0,19	0,62 ± 0,17
A362	2,94 ± 0,57	2,99 ± 0,59	2,69 ± 0,55	0,83 ± 0,17	2,66 ± 0,54	0,94 ± 0,16	0,59 ± 0,14	0,60 ± 0,14

⁽¹⁾PM-FAO, método padrão Penman-Monteith; PM-U, método padrão com valores de velocidade do vento estimados; PM-ea, método padrão com valores de pressão atual de vapor estimados; PM-RS, método padrão com valores de radiação solar estimados; PM-U -ea, método padrão com valores de velocidade do vento e pressão atual de vapor estimados; PM-U -RS, método padrão com valores de velocidade do vento e radiação solar estimados; PM-U -ea -RS, método padrão com valores de velocidade do vento, pressão atual de vapor e radiação solar estimados.

Fonte: Os autores

Andrade et al. (2011) afirmam que em regiões semiáridas os altos níveis de energia solar, junto com um aumento no calor (temperatura do ar) sensível pode causar aumentos nas taxas de evapotranspiração em plantas e alta demanda de água pela vegetação.

Em todas as estações os métodos alternativos PM-U -RS, PM-ea -RS e PM-U -ea -RS foram os que apresentaram menores valores de ETo, subestimando as médias em mais de 77% o método PM-FAO padrão, no período anual e mais de 56% nos períodos seco e chuvoso.

No período anual, o método PM-U obteve um desempenho muito bom, com exceção das estações de Canto do Buriti (A365) e Paulistana (A330), que apresentaram classificação "sofível" (Figura 1), o que pode ser atribuído a ocorrência de maiores valores de velocidade do vento nessa região, indicando que nessa região a velocidade do vento não pode ser desprezada na estimativa da ETo. As mesmas estações apresentaram também baixo desempenho para o período seco, acompanhado de a estação de Bom Jesus (A326). Para as demais estações, os períodos anual e seco, apresentou os melhores valores de desempenho, o que demonstra que os dados de estimativa de ETo por PM-U são confiáveis e pode ser utilizada quando não se dispõe de dados de velocidade do vento medidos no local.

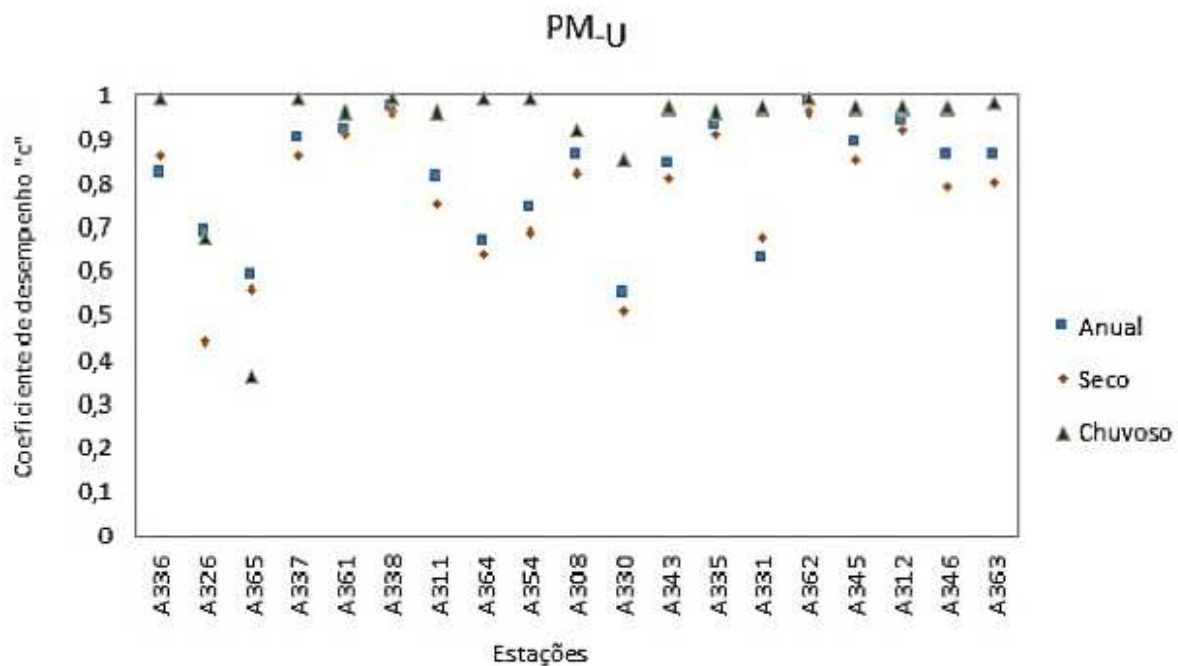


Figura 1. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária (mm.dia-1), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de velocidade do vento estimada (PM-U), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí.

Fonte: Os autores

Resultados semelhantes foram encontrados por Todorovic, Karic & Pereira (2013), em análise feita em 16 países do Mediterrâneo. Os autores obtiveram bons desempenhos para regiões semiáridas ou úmidas, para o mesmo modelo de estimativa. No estudo de Alencar, Sediya & Mantovani (2013), a estimativa de velocidade do vento, mostrou-se uma boa alternativa para a obtenção da ETo quase a totalidade das localidades estudadas em Minas Gerais.

O melhor desempenho para PM-U foi observado no período chuvoso, período de menores valores de vento registrados e baixa demanda evaporativa, sendo que as estações melhoraram o desempenho de "bom" para "ótimo" ou permaneceram com o mesmo desempenho se a classificação for "ótima", indicando confiabilidade nos dados de estimativa de ETo. Silva et al. (2010), analisando os períodos seco e chuvoso para a estimativa de ETo em Sobral e Tauá, encontraram um ótimo índice de confiança porque se tinha dados de velocidades registrados correspondentes aos períodos estudados. Mas quanto mais se distancia o valor de velocidade do vento do valor médio registrado há uma piora no desempenho. No presente trabalho, o mesmo comportamento foi observado em todos os períodos analisados, sendo que o valor de velocidade média do vento utilizado foi um único para todas as estações.

Quando se estima ETo pelo modelo PM-ea, para o período anual, as estações de Canto do Buriti (A365), Gilbués (A364) e Paulistana (A330) tiveram o menor desempenho classificado como "péssimo" (Figura 2). As estações de Floriano (A311), Oeiras (A354), Picos (A343) e Valença do Piauí (A363), localizadas no centro-sul do Estado obtiveram os desempenhos variando de "sofrrível" a "péssimo", o que pode ser motivado pelos valores baixos de umidade do ar, combinados com o de temperatura do ar muito altas. Allen et al. (1998) recomenda uma calibração para regiões áridas onde o valor de temperatura mínima é muito superior a temperatura do ponto de orvalho. Seguindo a essas recomendações, Alencar, Sediya & Mantovani (2013) subtraíram 1°C da temperatura mínima para as localidades de Janaúba, Januária, Mociminho, Montes Claros, Salinas e Teófilo Otoni; e diminuíram 2°C para Monte Azul, onde é mais árido. O mesmo procedimento foi utilizado por Wang et al. (2010) para a

região semiárida de Malawi, diminuindo 2°C.

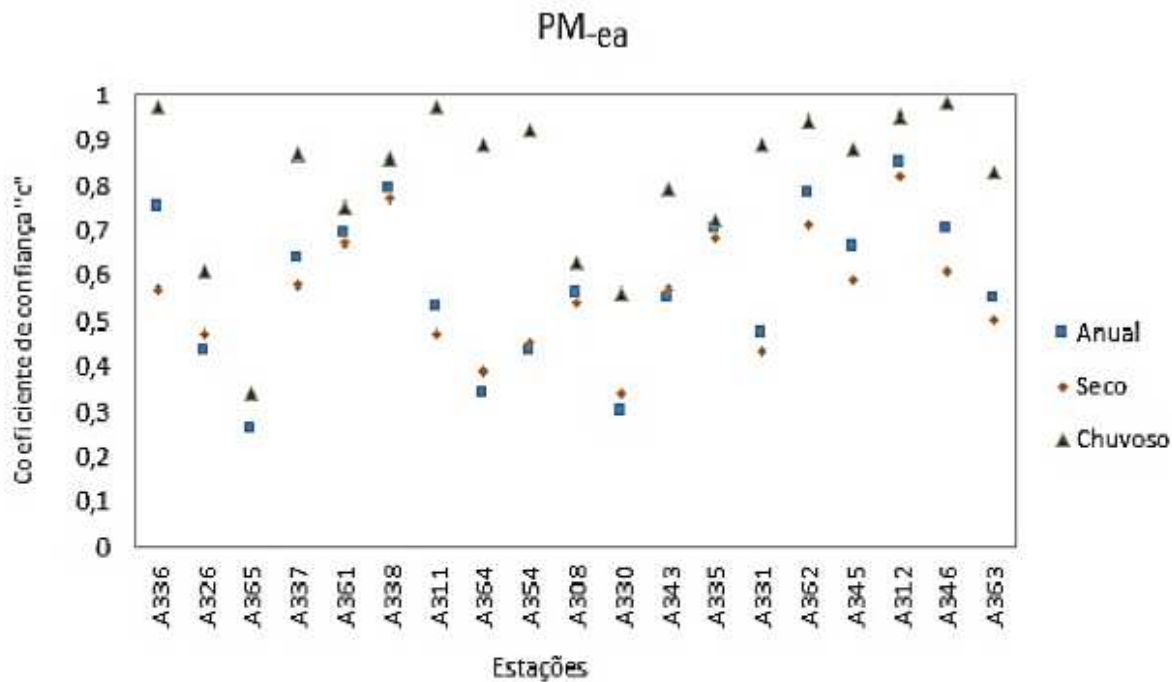


Figura 2. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de velocidade do vento estimada (PM_{ea}), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí.

Fonte: Os autores

Mesmo sem a calibração da temperatura mínima, obteve-se bons resultados em algumas estações. As estações localizadas ao centro-norte e norte do Estado apresentaram desempenho variando de "bom" a "ótimo", com exceção de Parnaíba (A308) com desempenho "sofrível", o que pode ter ocorrido pelo fato da estação se localizar no litoral, estando sujeita a altos valores de umidade relativa do ar. Carvalho et al. (2015) observaram, também, que o método padrão com uso de pressão de vapor estimada pelas temperaturas máxima e mínima é uma alternativa promissora para todas as estações de Minas Gerais, quando não se dispõe de medidas de temperatura do ponto de orvalho para se estimar e evapotranspiração de referência.

Na análise da estimativa de PM_{ea} , para o período chuvoso, o desempenho apresenta-se com classificação muito boa variando de "mediano" a "ótimo", com exceção Canto do Buriti (A365) e Paulistana (A330) com desempenho "péssimo" e "sofrível", respectivamente, devido ao baixo índice de concordância que se apresentou com valores baixos, com "d" igual a 0,35 e 0,70, respectivamente. A estimativa de ET_0 por PM_{ea} não se apresentou confiável nas estações de Canto do Buriti (A365) e Paulistana (A330) nesse período, o que pode indicar que nessas duas estações há a necessidade de uma ajuste na temperatura mínima utilizada como recomendaram Allen et al. (1998). Bezerra et al. (2014) ressaltam que a evapotranspiração sofre maior influência das variáveis mais simples de obtenção, temperatura do ar e umidade relativa, em relação às variáveis mais complexas de obtenção da parcela de energia incidente da radiação solar global, no semiárido.

Na figura 3 é apresentada a análise de desempenho da estimativa de ET_0 por PM_{RS} . Para todos os períodos, anual, seco e chuvoso, o desempenho foi ruim variando de "sofrível" a "péssimo", influenciado principalmente pelos valores do índice de concordância (d) que se apresentaram muito baixos, o que demonstra que nenhuma estação apresenta dados de estimativas confiáveis para a estimativa de ET_0 por PM_{RS} , quando relacionado ao PM_{FAO} padrão. Alencar, Sedyama & Mantovani (2013) também obtiveram desempenho insatisfatório na ausência de

dados de radiação solar para Minas Gerais e recomendam adotar o método que melhor se ajusta aos dados de radiação solar e que se adapta às condições climáticas de cada local. Para o sul de Ontário, Sentelhas, Gillespie & Santos (2010) afirmam que PM-RS não é bom o suficiente para estimar Eto. O contrário foi observado por Rocha et al. (2011), na bacia do Jaguaribe, no Ceará, onde a metodologia para estimativa da ETo PM-RS funcionou satisfatoriamente. Carvalho et al. (2015) recomendam o método para regiões interioranas, onde se tem um desempenho estatístico satisfatório, mas não recomendam o seu uso em regiões litorâneas.

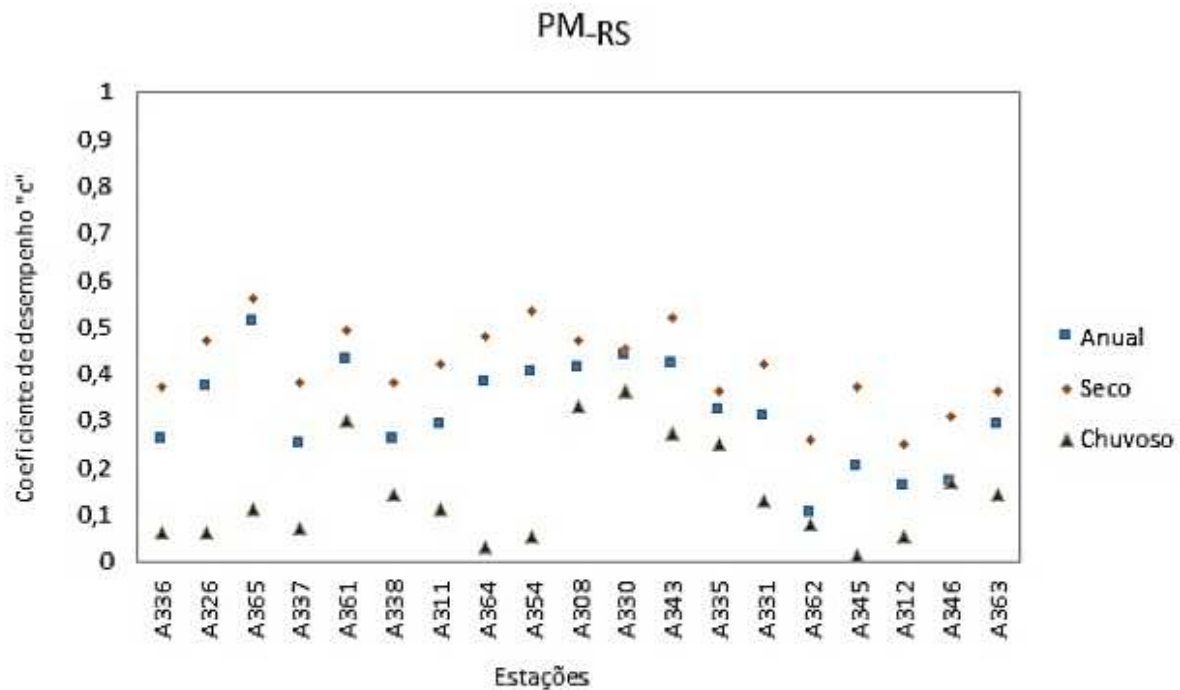


Figura 3. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária (mm.dia^{-1}), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de radiação solar (PM-RS), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí.

Fonte: Os autores

Na análise do desempenho de PM-U -ea (ver figura 4), no período anual, as estações que obtiveram melhores valores de desempenho foram: Caracol (A337), Castelo do Piauí (A361), Esperantina (A338), Piripiri (A335), São Pedro do Piauí (A331) e Teresina (A312), com valores de "c" 0,67, 0,72, 0,79, 0,71, 0,79 e 0,64, respectivamente. Embora as estações tenham apresentado altos valores de correlação, os índices de confiança se mostraram com baixos valores o que pode ter influenciando a baixa no desempenho.

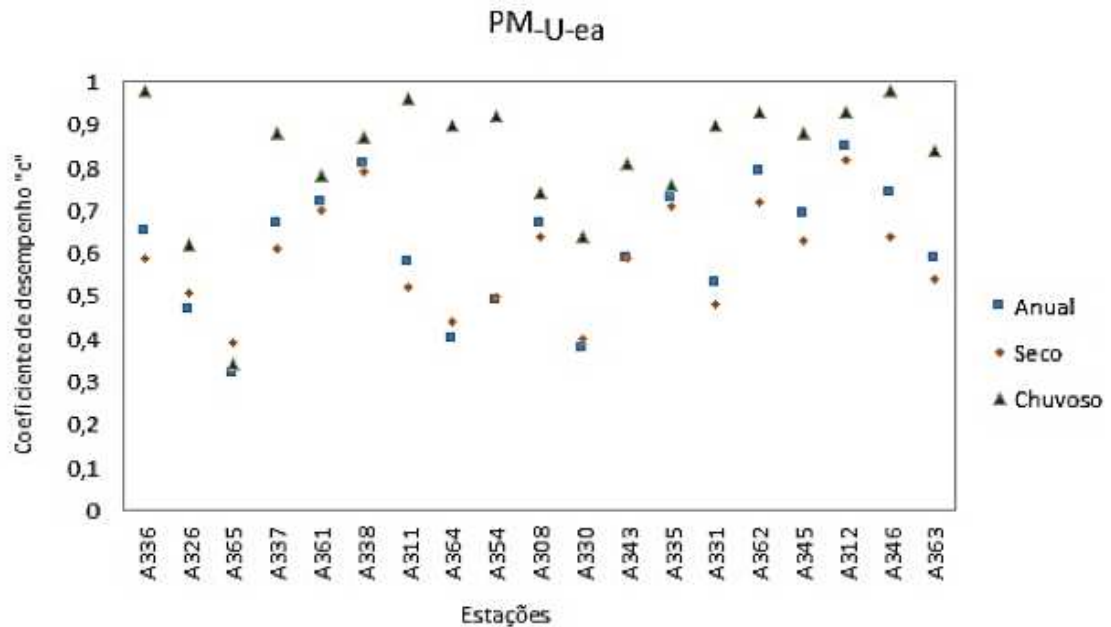


Figura 4. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de velocidade do vento e pressão de vapor atual (PM-U-ea), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí

Fonte: Os autores

Durante o período seco, para PM-U-ea , percebe-se que há uma variação de "péssimo" a "muito bom" no desempenho. Apenas as estações de Canto do Buriti (A365) e Paulistana (A330) apresentaram desempenho "péssimo". As estações do centro ao norte do Estado apresentaram melhor desempenho com exceção de Parnaíba (A308) e Valença do Piauí (A363), com desempenho "mediano" e "sofrível", respectivamente. As estações que apresentaram melhor desempenho foram: Castelo do Piauí (A361), Esperantina (A338) ($c = 0,77$), Piri-piri (A335) ($c = 0,68$), São Pedro do Piauí (A362) ($c = 0,71$) e Teresina (A312), com valores de "c" de 0,67, 0,77, 0,68, 0,71 e 0,82, respectivamente.

As estações de Bom Jesus (A326), Caracol (A337), Floriano (A311), Gilbués (A364), Parnaíba (A330), São Raimundo Nonato (A345) e Valença do Piauí (A363) apresentaram uma melhora no desempenho, no período seco. O que pode indicar que a inserção da média da velocidade do vento na equação de PM-FAO, quando se estima a pressão de vapor atual por meio de dados de temperatura do ar, melhora o desempenho. WANG et al. (2010), afirmam que, provavelmente, a umidade relativa pode acentuar o efeito do vento sobre a E_{To} , isso poderia explicar o fraco desempenho do procedimento de estimação FAO quando estas duas variáveis estão faltando em uma área de com muito vento.

Ao analisar PM_{U-ca} , para o período chuvoso, observou-se que as estações variaram sua classificação de desempenho de “mediano” a “ótimo”, com exceção de Canto do Buriti que manteve desempenho “péssimo”. Quando comparados aos períodos anual e seco, nota-se que as estações melhoram seu desempenho, com exceção de Parnaíba e Teresina que mantiveram o desempenho de anual. Somente as estações de Bom Jesus, Canto do Buriti e Paulistana se mostraram com dados de estimativa de ETo pouco confiável pela equação de PM_{U-ca} . As demais estações podem utilizar o modelo para como alternativa para se estimar ETo, quando não se tem disponível de medidas de velocidade do vento e temperatura de ponto de orvalho.

Ao analisar-se PM_{U-RS} ; PM_{ca-RS} e $PM_{U-ca-RS}$ (Figuras 5, 6 e 7), todas as estações apresentaram desempenho classificado como “péssimo” em relação à PM_{FAO} com todas variáveis medidas. Os baixos valores de “c” se devem aos baixos valores de índice de concordância e de correlação. Logo, os dados de estimativa de ETo por PM_{U-ca} ; PM_{ca-RS} e $PM_{U-ca-RS}$ não são confiáveis para nenhuma estação. Resultados postos foram encontrados por Jabulon & Sahli (2008) e Silva et al. (2013) que verificaram que o modelo da PM_{FAO} usando apenas temperaturas máximas e mínimas, em geral, apresentam valores de estimativas de ETo de forma satisfatórias e bons desempenhos, se comparado a FAO_{PM} .

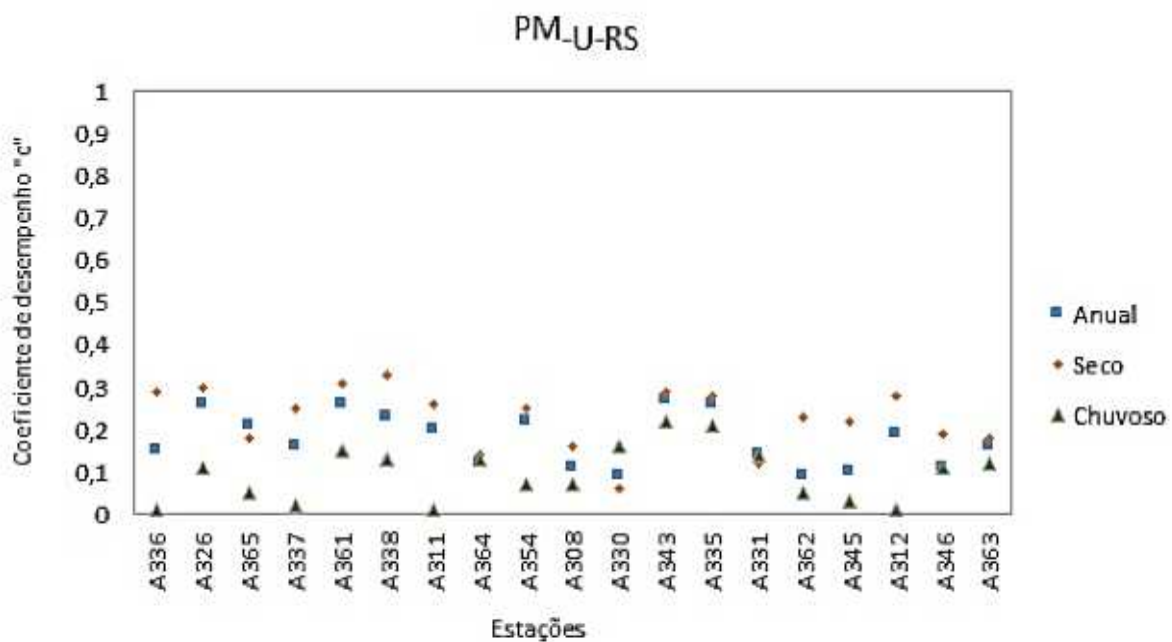


Figura 5. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária ($mm.dia^{-1}$), calculado a partir de simulações de modelos PM_{FAO} com valores estimados de velocidade do vento e radiação solar (PM_{U-RS}), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/ $FAO-56$, aplicado às estações do estado do Piauí

Fonte: Os autores

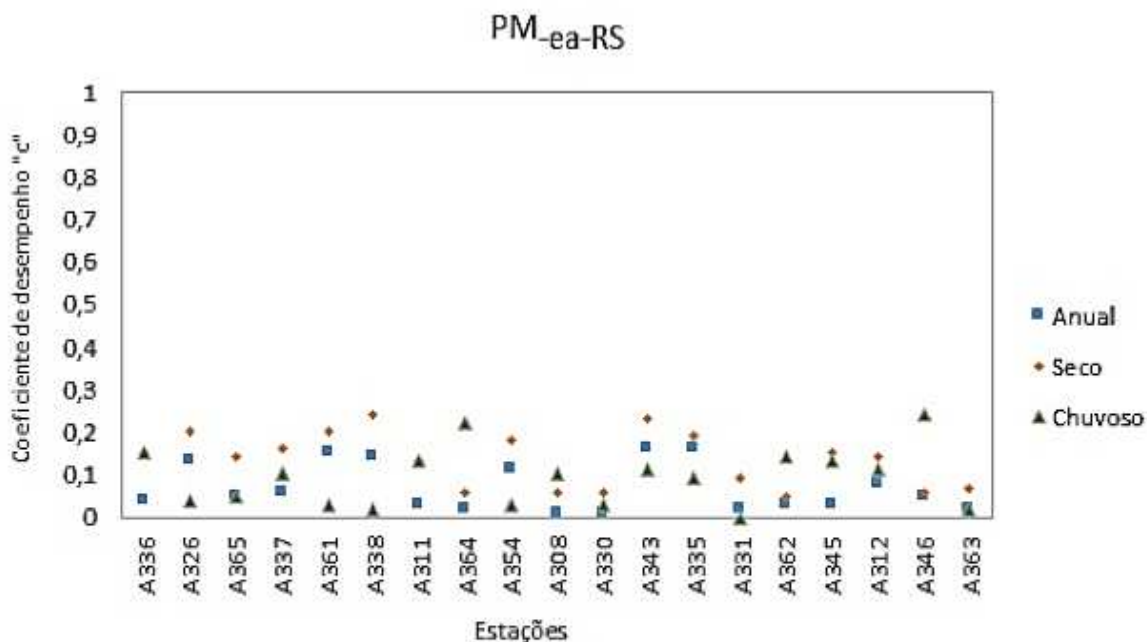


Figura 6. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária (mm.dia⁻¹), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de pressão atual de vapor e radiação solar (PM_{ea-RS}), relacionado ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí

Fonte: Os autores

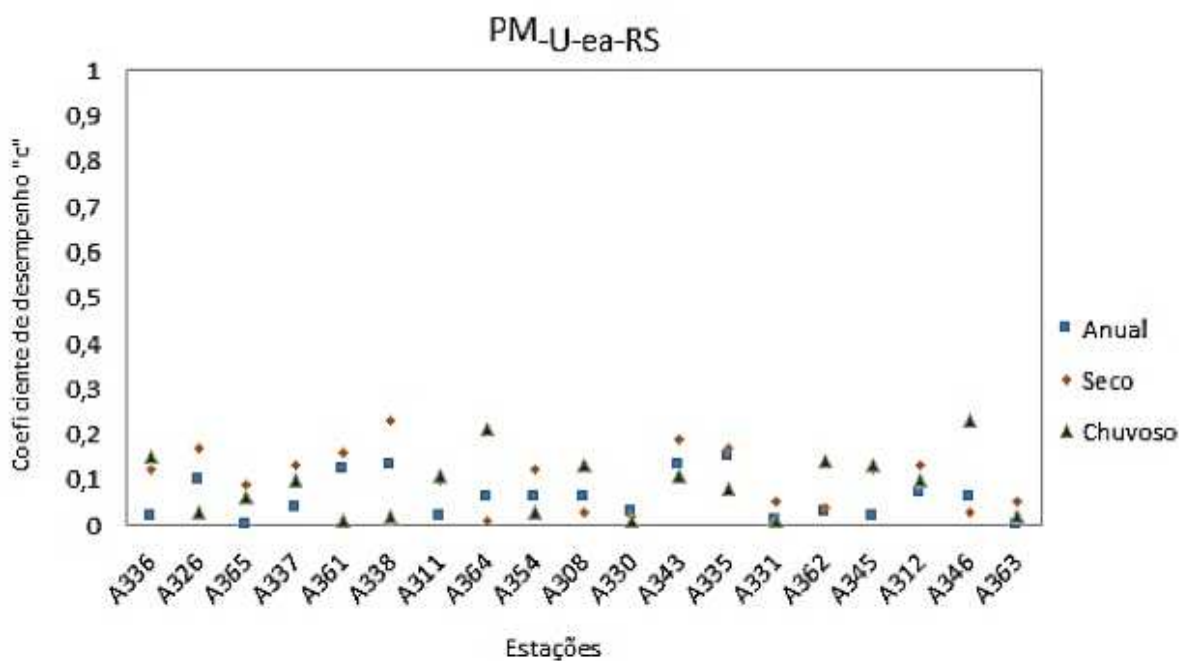


Figura 7. Índice de desempenho ou confiança (c) para evapotranspiração de referência em escala diária (mm.dia⁻¹), calculado a partir de simulações de modelos PM-FAO com valores estimados de velocidade de vento, pressão atual de vapor e radiação solar (PM_{U-ea-RS}), combinados e relacionados ao método padrão Penman-Monteith/FAO-56, aplicado às estações do estado do Piauí.

Fonte: Os autores

Quando combina mais de uma variável estimada e inseridas em PM-FAO os resultados não são satisfatórios. Resultados semelhantes foram encontradas por Wang et al. (2010) para a região de Malawi, e ressaltam que esses modelos não são bem executados como numa situação onde apenas uma variável é estimada. Alencar, Sediya & Mantovani (2013) alertam que na ausência dos três elementos climáticos estudados, o método de Penman-Monteith tende a superestimar a ETo em 15 das 20 localidades estudadas por eles.

Obsevou que a estimativa de ETo, separada por período seco e chuvoso, produz melhores resultados, e que os modelos que não utilizam dados de radiação solar estimados, o período chuvoso é o que apresenta-se com melhores resultados. E quando essa variável encontra-se envolvida no modelo, o período seco se mostra com melhores resultados.

A estação de Canto do Buriti foi a única que não apresentou desempenho estatístico satisfatório, em nenhum dos métodos analisados, recomenda-se a aplicação de outros métodos para a estimativa de ETo no município.

4. Conclusões

A estimativa de ETo com dados ausentes de velocidade do vento (PM-U) foi a que mais ajustou aos dados de ETo estimados por PM-FAO com todos os dados climáticos, sendo recomendável a sua utilização quando não se dispõe de dados de velocidade de vento medido.

A adoção do método com ausência de dados medidos de pressão de vapor atual do ar (PM-ea) é recomendado apenas no período chuvoso.

As estimativas de ETo com ausência de dados medidos de radiação solar (PM_{RS}), e os métodos combinados: PM_{U-ea}, PM_{U-RS}, PM_{ea-RS} e PM_{U-ea-RS} não são recomendáveis para o Piauí.

Referências

- ALENCAR, L. P. de; SEDIYAMA G. C.; MANTOVANI, E. C. (2015); Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. Revista Engenharia Agrícola, v.35, n.1, jan.- fev.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998); Crop e evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 297p (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, M. M. A.; MENDONÇA, M. A. B.; CHAVES, L. C. G.; FEITOZA, R. M. (2011); Investigation of the maximum and minimum temperatures in the semi-arid region of northeastern Brazil. Revista Agro@mbiente On-line, v. 5, n. 2, p. 82-87.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N. (2005); Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. Revista Ciência Agronômica, v. 36, n. 02, p. 143-151.
- BARROS, V. R.; SOUZA, A. P. de; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. da (2009); Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, abr./jun.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. (1997); Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n.1, p.89-97.
- CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. (2015); Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 1, p. 1-11, jan.
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. (2011); Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set.
- FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; ARAÚJO, M. J. V.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. (2011); Estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal com os métodos de Penman-

- Monteith, Thornthwaite, Priestley-Taylor para Parnaíba-Piauí. [Acesso em: 02 de setembro de 2014] Disponível em: <<http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/finep/metasp.../file>>
- JABULON, M. de; SAHLI, A. (2008); 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.
- LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. de S.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. (2006); Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 85, n. 1, p. 15-26.
- POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. (2006); Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage*. v.55, p.201-2015.
- ROCHA, E. J. T.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JÚNIOR, S. C. F.; GONDIM, R. S. (2011); Estimativa da Eto pelo modelo PenmanMonteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 75-83.
- SAS INSTITUTE (1989) Inc., SAS/STAT: user's guide. version 6, fourth edition, v-1, cory, nc:SAS Institute Inc., p. 943.
- SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. (2010); Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 635–644.
- SILVA, M. GOMES; OLIVEIRA, J. B.; LÊDO, E. R. F.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, E. M. (2010); 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. *Revista ACTA Tecnológica*, v. 5, n. 2, jul.-dez.
- SILVA, M. G. da; ARRAES, F. D. D.; LEDO, E. R. F.; SANTOS, N. T.; SILVA FILHO, J. A. da (2013); Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará. *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 7, n. 3, set.-dez., p. 284-293.
- TAGLIAFERRE, C.; SILVA, J.P.; PAULA, A.; GUIMARAES, D.U.G.; BARROSO, N.I.S. (2012); Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Estado da Bahia. *Revista Caatinga*, v. 25, p.136–143.
- TODOROVIC, M.; KARIC, B.; PEREIRA, L.S. (2013); Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, v. 481, p.166-176.
- WANG, Y.; NAMAONA, W.; GLADDEN, L. A.; TRAORE, S.; DENG, L. (2010); 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, may 04.
- 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*, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, sep.20.

-
1. Aluna de doutorado em Agronomia. Faculdade de Ciências Agronômica/UNESP –Botucatu/SP – Brasil. Email: clescy@gmail.com
 2. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – Brasil. Email: aderson.andrade@embrapa.br
 3. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – Brasil. Email: valdemicio.sousa@embrapa.br
 4. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – Brasil. Email: valdenir.queiroz@embrapa.br
 5. Professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP. Piracicaba/SP – Brasil. Email: psentel.esalq@usp.br
-

Revista Espacios. ISSN 0798 1015

Vol. 37 (Nº 23) Año 2016

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](mailto:webmaster@revistaespacios.com)]