



Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE¹

João C. F. Borges Júnior², Raimundo J. Anjos³, Tonny J. A. Silva⁴,
José R. S. Lima⁵ & Camilo L. T. Andrade⁶

RESUMO

Para o manejo da irrigação com alta frequência e com base em dados climáticos, é desejável que a estimativa da evapotranspiração de referência seja feita para pequenos intervalos de tempo. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho dos métodos FAO-24 Radiação, Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Camargo-71 e Blaney-Criddle, para estimativa da evapotranspiração de referência em base diária na microrregião de Garanhuns, PE, por meio de comparações com o método padrão FAO Penman-Monteith. Com suporte no erro absoluto médio (EAM), verificou-se, dentre outros indicadores, que o melhor desempenho foi obtido com o método de Priestley-Taylor. Em relação aos métodos aplicáveis quando apenas dados de temperatura foram disponíveis, o de Hargreaves-Samani foi o que apresentou melhor desempenho, tendo sido calibrado com base na minimização do EAM.

Palavras-chave: avaliação de modelos, erro absoluto médio, índice de confiança

Daily reference evapotranspiration estimating methods for the Garanhuns, PE micro-region

ABSTRACT

For high frequency irrigation management, based on climate data, it is desirable to estimate reference evapotranspiration at small time steps. This work aimed at to evaluate the performance of daily reference evapotranspiration estimated by the following methods: FAO-24 Radiation, Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Camargo-71 and Blaney-Criddle, for Garanhuns-PE micro-region, having FAO Penman-Monteith method as standard. Considering the mean absolute error (MAE), among other statistics, it was verified that the best performance was obtained by the Priestley-Taylor method. Regarding the methods applicable when only temperature data are available, the Hargreaves-Samani showed the best performance, having been calibrated based on the minimization of the MAE.

Key words: model assessment, mean absolute error, reliability index

¹ Apoio financeiro: CNPq (Processo nº 485283-2007-7)

² CSL/UFSJ, CP 56, CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG. Fone: (31) 3697-2032; 3697-2022. E-mail: jcborges@ufsj.edu.br

³ INMET, Rua São João 504, São José, CEP 50020-150, Recife, PE. Fone: (81) 3424-1680. E-mail: raimundo.anjos@inmet.gov.br

⁴ UFMT, Rodovia Rondonópolis/Guiratinga, CEP 78735-901, Rondonópolis, MT. Fone: (66) 3410-4098. E-mail: tonny.silva@pq.cnpq.br

⁵ UAG/UFRPE, Av. Bom Pastor s/n, Boa Vista, CEP 55296-901, Garanhuns, PE. Fone: (87) 3761-0882. E-mail: jose.romualdo@pq.cnpq.br

⁶ Embrapa Milho e Sorgo, CP 151, CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG. E-mail: camilo@cnpmc.embrapa.br

INTRODUÇÃO

A microrregião de Garanhuns está localizada no Agreste Meridional Pernambucano, compondo a parte alta da bacia do rio Mundaú, cuja foz se encontra no Estado de Alagoas. Esta bacia é uma das que compõem a porção sul da Unidade Hidrográfica Atlântica Nordeste Oriental, que se caracteriza por apresentar a relação mais crítica entre demanda e disponibilidade hídrica, dentre as unidades hidrográfica do País (ANA, 2009). Dado a esta relação crítica, é imperativos para a expansão da agricultura irrigada na microrregião de Garanhuns o emprego de métodos de irrigação e estratégias de manejo eficientes.

No cenário atual a agricultura irrigada na microrregião de Garanhuns se caracteriza pelo predomínio do método de irrigação por gotejamento para olerícolas e café, verificando-se também, por outro lado, o cultivo de frutícolas, no qual ainda se emprega o método de microaspersão. A alta frequência de irrigação é inerente ao método de irrigação por gotejamento (Andrade & Borges Júnior, 2008; Choudhary et al., 2010), sendo comum a prática de irrigações diárias.

A utilização de estratégias de manejo de irrigação baseadas no monitoramento de elementos meteorológicos requer o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o), definida como evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica ou nutricional, com altura média de 0,12 m, resistência da superfície de 70 s m⁻¹ e albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). Tendo-se como modelo, então, a ET_o e os coeficientes de cultura, calcula-se a evapotranspiração potencial, ET_c, configurando-se um procedimento de duas etapas (Sediyama, 1996).

Utilizando-se dados meteorológicos como entrada, diversas equações para estimativa da ET_o têm sido desenvolvidas com variável complexidade e requerimento de dados, constituindo-se em métodos indiretos que podem ser classificados com base no requerimento de dados em combinados (Penman-Monteith e FAO-24 Penman), de radiação (FAO-24 Radiação e Priestley-Taylor) e de temperatura (FAO-24 Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Camargo-71). É vasta a literatura técnica de abordagem sobre esses métodos, citando-se Doorenbos & Pruitt (1975), Jensen et al. (1990), Sediyama (1996), Pereira et al. (1997), Allen et al. (1998), Camargo & Camargo (2000), Vega & Jara (2009) e Sousa et al. (2010), dentre outros.

O método FAO Penman-Monteith, no qual se emprega o conceito de cultura hipotética, é considerado padrão, sendo recomendado por Allen et al. (1998). Embora tenham sido verificados consistência e ótimo desempenho deste método (Jensen et al., 1990), o requerimento de um conjunto amplo de dados impõe obstáculos à sua difusão, sobretudo aos pequenos produtores para os quais os custos de aquisição de estações meteorológicas automáticas são, ainda, impeditivos. Quando uma base mais ampla de dados meteorológicos não é disponível, faz-se necessário o emprego de métodos mais simples, com menor requerimento de dados.

Deve-se observar, contudo, que o desempenho dos vários métodos na determinação da evapotranspiração de referência depende das condições climáticas locais (Jensen et al., 1990;

Allen et al., 1998). Dado o empirismo característico de métodos com baixo requerimento de dados de entrada, verificações e calibrações regionais, quando não locais, propiciarão ganhos em termos qualitativos da estimativa da ET_o e no estabelecimento do manejo de irrigação.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho dos métodos FAO-24 Radiação Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Camargo-71 e Blaney-Criddle, de estimativa da evapotranspiração de referência em base diária, para a microrregião de Garanhuns, PE, com base em comparações com o método padrão FAO Penman-Monteith.

MATERIAL E MÉTODOS

Base de dados

Empregaram-se dados meteorológicos em base diária, obtidos na Estação Meteorológica Convencional do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (3º Distrito de Meteorologia), localizada no município de Garanhuns, na latitude 8° 53' Sul, longitude 36° 31' Oeste e altitude de 823 m. O clima é tropical chuvoso, com verão seco; a estação chuvosa se inicia no outono e engloba o inverno e o início da primavera. Os dados trabalhados foram relativos aos seguintes elementos meteorológicos: temperaturas máxima (T_{max}; °C), média (T_{med}; °C) e mínima (T_{min}; °C), insolação (n; h d⁻¹), velocidade do vento média diária (U; m s⁻¹), umidade relativa do ar média diária (UR; %) e precipitação (PRE, mm).

Na estação do INMET, T_{max} é colhida a 00:00 UTC; T_{min} é colhida nas 12:00 UTC; T_{med} (diária) é obtida através da soma da temperatura, nas 12:00 UTC, mais duas vezes a temperatura nas 24:00 UTC, mais a temperatura máxima, mais a temperatura mínima, dividindo-se por cinco; o sensor de velocidade do vento fica a 10 m de altura; a umidade relativa média diária é obtida pela soma das umidades relativas, às 12:00, 18:00 e duas vezes, nas 24:00 UTC, dividindo-se por quatro; a insolação é medida empregando-se um heliógrafo tipo Campbell-Stokes; a chuva diária acumulada é colhida nas 12:00 UTC. A conversão da velocidade do vento para altura de 2 m foi feita conforme Allen et al. (1998).

A série histórica utilizada abrangeu os anos de 1986 a 2008. Os dados foram tabulados em planilha eletrônica, em que se procedeu a uma análise de consistência, visando identificar valores discrepantes. Um arquivo foi gerado contendo diversas planilhas, cada uma relativa a um ano, em que foram feitas verificações dos dados de U, UR e INS, bem como das subtrações T_{max} - T_{med} e T_{med} - T_{min}, empregando-se procedimentos automáticos disponíveis na planilha eletrônica (macros). Uma análise visual de gráficos das variáveis versus tempo complementou a verificação de consistência dos dados. Ocorrências de valores de U superiores a 8 m s⁻¹, UR superiores a 100%, INS superiores a 13 h, foram identificadas descartando-se os respectivos dados. Para as subtrações de temperatura com resultados negativos, possíveis trocas nos valores de T_{max} e T_{min} foram corrigidas ou os dados discrepantes foram descartados.

Quando valores de T_{med} não estavam disponíveis eles foram calculados como a média aritmética de T_{max} e T_{min}. Quando um

dado de T_{\max} ou T_{\min} estava faltoso, considerava-se a média dos dias imediatamente anterior e posterior, já que esses dados são mínimos necessários ao estudo. Foram descartados os anos em que se constataram falhas de dados de temperatura máxima e mínima em períodos superiores a dez dias subsequentes. Reduziu-se, então, a série contínua de 23 anos (1986 a 2008) a uma série descontínua de quinze anos, descartando-se os anos de 1987, 1988, 1990, 1991, 1992, 1994, 1998 e 2008.

Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência

Os métodos FAO Penman-Monteith, FAO-24 Radiação e Priestley-Taylor, foram aplicados empregando-se o programa REF-ET (Allen et al., 2000), com procedimentos descritos também em Allen et al. (1998), enquanto os métodos Blaney-Criddle, Camargo-71 e Hargreaves-Samani foram implementados na planilha eletrônica Excel (Microsoft® Corporation).

O método FAO Penman-Monteith é sintetizado na seguinte equação (Allen et al., 1998):

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

em que:

ET_o - evapotranspiração de referência, $mm\ d^{-1}$

Δ - declividade da curva de pressão de vapor na saturação versus temperatura do ar, $kPa\ ^\circ C^{-1}$

R_n - saldo de radiação na superfície do cultivo, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$

G - densidade de fluxo de calor no solo, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$

γ - constante psicrométrica, $kPa\ ^\circ C^{-1}$

U_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$

e_s - pressão de vapor na saturação, kPa

e_a - pressão de vapor atual, kPa

T_{med} - temperatura média do ar tomada a 2 m de altura, $^\circ C$

O método FAO-24 Radiação é descrito por Doorenbos & Pruitt (1975), demandando observações de insolação, nebulosidade ou radiação, além da temperatura do ar. Pode ser empregado na ausência de dados de umidade relativa e velocidade do vento requerendo, contudo, o conhecimento de níveis gerais desses elementos para o local. A relação sugerida pelos autores é:

$$ET_o = a + b(W R_s) \quad (2)$$

em que:

a - coeficiente linear da reta, $mm\ d^{-1}$

b - coeficiente angular da reta, adimensional

W - índice de ponderação dependente da temperatura e altitude, adimensional

R_s - radiação solar de ondas curtas recebida pela superfície terrestre em um plano horizontal, expressa em equivalente de evaporação, $mm\ d^{-1}$

Valores dos coeficientes a e b são apresentados em figuras, por Doorenbos & Pruitt (1975), levando-se em conta condições

gerais de umidade relativa e velocidade do vento do local. Apesar disso, expressões para calcular esses coeficientes estão disponíveis na literatura (Jensen et al., 1990) e foram implementadas no programa REF-ET.

A equação empregada no método de Priestley-Taylor desenvolvido na Austrália, tem a seguinte forma (Jensen et al., 1990; Allen, 2000):

$$ET_o = 1,26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) \quad (3)$$

O método de Blaney-Criddle foi implementado em planilha eletrônica, conforme descrito na publicação FAO-24 (Doorenbos & Pruitt, 1975). Mesmo assim, algumas diferenças relativas à obtenção dos coeficientes foram empregadas utilizando-se procedimentos equivalentes aos do programa REF-ET (Allen, 2000). A aplicação do método de Blaney-Criddle foi feita considerando-se apenas os dados de temperatura máxima, mínima e média, visando-se simular uma situação de escassez de dados. A ET_o é determinada por meio da equação (Jensen et al., 1990):

$$ET_o = a_{BC} + b_{BC} f \quad (4)$$

em que:

a_{BC} - coeficiente linear da relação entre ET_o e f , $mm\ d^{-1}$

b_{BC} - coeficiente angular da relação entre ET_o e f

f - fator de uso consuntivo (o produto $b_{BC} f$ tem unidade $mm\ d^{-1}$)

O fator de uso consuntivo é obtido através da equação:

$$f = p(0,46T_{med} + 8,13) \quad (5)$$

em que: p é a porcentagem de horas diurnas anuais durante o período considerado. Os coeficientes a_{BC} e b_{BC} foram calculados empregando-se as equações (Jensen et al., 1990; Allen, 2000):

$$a_{BC} = 0,0043 UR_{min} - n/N - 1,41 \quad (6)$$

$$b_{BC} = 0,908 - 0,00483 UR_{min} + 0,7949(n/N) + 0,0768[\ln(U_d + 1)]^2 - 0,0038 UR_{min} (n/N) - 0,000443 UR_{min} U_d + 0,281[\ln(U_d + 1)]\{\ln[(n/N) + 1]\} - 0,00975[\ln(U_d + 1)]\{\ln(UR_{min} + 1)\}^2\{\ln[(n/N) + 1]\} \quad (7)$$

em que:

UR_{min} - umidade relativa mínima diária, %

n - duração da insolação diária, h

N - duração máxima possível da insolação diária, h

U_d - velocidade diurna do vento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$

A UR_{min} foi obtida conforme descreve Allen (2000). Para obtenção da duração da insolação diária, n , empregou-se a fórmula de radiação de Hargreaves (Allen et al., 1998):

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (8)$$

em que:

k_{Rs} - coeficiente de ajustamento, $^{\circ}\text{C}^{-0,5}$, variando de 0,16 a 0,19

R_a - radiação solar extraterrestre recebida em uma superfície horizontal, expressa em equivalente de evaporação, mm d^{-1}

Utilizou-se o valor de k_{Rs} igual a 0,16, recomendado para locais interiores, não influenciados por grandes corpos hídricos. Com base no valor calculado de R_s , obteve-se n por meio da fórmula de Angstrom (Allen et al., 1998, explicitando para n):

$$n = \left(\frac{R_s}{R_a} - a_s \right) \frac{N}{b_s} \quad (9)$$

em que a_s e b_s são coeficientes para os quais se utilizaram os valores, respectivamente, iguais a 0,25 e 0,5, conforme recomendado por Allen et al. (1998) para quando dados locais não são disponíveis.

Utilizou-se interpolação linear em tabelas de Allen et al. (1998) para obtenção de valores de N , R_a e p , com base na latitude da estação. Considerou-se a velocidade média do vento no período diurno a 2 m de altura, U_d , igual a 2 m s^{-1} (apenas para o método de Blaney-Criddle), conforme recomendado por Allen et al. (1998).

O método Camargo-71 tem apresentado resultados similares aos obtidos com a equação original de Thornthwaite (Camargo & Camargo, 2000). Trata-se de uma equação simples, como descrito abaixo:

$$\text{ETo} = R_a T_{\text{med}} K D \quad (10)$$

em que:

K - fator de ajuste igual a 0,01, para T_a (temperatura média anual do local) até $23,5^{\circ}\text{C}$; 0,0105 para T_a de $23,6$ a $24,5^{\circ}\text{C}$; 0,011 para T_a de $24,6$ a $25,5^{\circ}\text{C}$; 0,0115 para T_a de $25,6$ a $26,5^{\circ}\text{C}$; 0,012 para T_a de $26,6^{\circ}\text{C}$ a $27,5$; 0,013 para T_a superior a $27,5^{\circ}\text{C}$

D - duração do período (neste trabalho considerado igual a um, por ser ETo diária)

Visando-se impor maior sensibilidade do método de estimativa da ETo em relação a variações da temperatura considerou-se, para definir o valor de K , a variável T_{med} ao invés de T_a . Procedimentos computacionais (macros) foram implementados na planilha eletrônica, para obtenção de K .

O método Hargreaves-Samani requer apenas dados de temperaturas, tendo a equação a seguinte forma (Jensen et al., 1990; Pereira et al., 1997), adaptada à simbologia aqui empregada:

$$\text{ETo} = 0,0023 R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} (T_{\text{med}} + 17,8) \quad (11)$$

Comparação dos métodos

Como estatísticas e indicadores para comparação de desempenho dos métodos avaliados frente ao método padrão FAO Penman-Monteith, consideraram-se: (1) o erro absoluto médio (EAM); (2) a raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM); (3) a raiz quadrada do erro quadrado médio sistemático (REQMs); (4) a raiz quadrada do erro quadrado médio não sistemático (REQMns); (5) as proporções do erro quadrado médio sistemática e não sistemática; (6) o índice de concordância (d); (7) o índice de confiança (C); (8) os coeficientes de correlação (r) e (9) determinação (R^2) e (10) os coeficientes linear e angular da reta de regressão (a_R e b_R , respectivamente). As expressões seguintes foram empregadas (Willmott, 1982; Camargo & Sentelhas, 1997; Willmott & Matsuura, 2005):

$$\text{EAM} = N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} |P_i - O_i| \quad (12)$$

$$\text{REQM} = \text{EQM}^{0,5} = \left[N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (13)$$

$$\text{REQMs} = \text{EQMs}^{0,5} = \left[N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} (\hat{P}_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (14)$$

$$\text{REQMns} = \text{EQMns}^{0,5} = \left[N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} (\hat{P}_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (15)$$

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^{N_d} (P_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^{N_d} (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2 \right] \quad (16)$$

$$C = d r \quad (17)$$

em que:

N_d - número de pares de dados

P_i - valor de ETo estimado pelo método avaliado, mm

O_i - valor de ETo estimado pelo método padrão FAO Penman-Monteith, mm

EQM - erro quadrado médio, mm^2

EQMs - erro quadrado médio sistemático, mm^2

\hat{P}_i - estimador de P_i com base no modelo de regressão linear, mm

EQMns - erro quadrado médio não sistemático, mm^2

\bar{O} - média dos valores O_i , mm

Obtém-se o índice C pelo produto do índice de precisão (coeficiente de correlação, r) pelo índice de exatidão (d)

podendo-se, por meio deste índice, classificar o desempenho do método, conforme critérios sugeridos por Camargo & Sentelhas (1997). Além dos indicadores acima descritos, tanto para o método padrão quanto para cada um dos métodos avaliados, foram calculados as médias, desvios padrão (S_d), coeficiente de variação (CV), máximos e mínimos. Gráficos relativos à regressão visando auxiliar a análise visual, também subsidiaram as comparações.

O conjunto de estatísticas foi definido procurando-se gerar base de comparação com outros trabalhos, abordando o assunto. Ressalta-se, porém, a recomendação de Willmott & Matsuura (2005), relativa ao uso de EAM em comparações baseadas no erro médio, sendo este indicador a medida do erro médio mais natural, não apresentando ambiguidades inerentes à REQM.

Utilizaram-se REQMs e REQMs com o objetivo de identificar porções sistemáticas e não sistemáticas em REQM. Observa-se que as relações EQMs/EQM e EQMs/EQM definem porções sistemáticas e não sistemáticas, respectivamente, presumidamente inerentes aos modelos avaliados em que o sistema é conservativo, dado que o EQMs, somado ao EQMs, equivale ao EQM. Empregam-se as raízes quadradas de EQMs e EQMs com o objetivo de interpretar tais diferenças na unidade de P_i e O_i (mm), apresentando-as em conjunto com EAM e REQM, conforme sugerido por Willmott (1982).

Procederam-se às comparações agrupando-se os dados diários em dois semestres que apresentam características climáticas distintas: um semestre mais seco, abrangendo o período de outubro a março, com maior demanda evapotranspi-

rométrica, e um semestre mais chuvoso, de abril a setembro. O semestre mais seco foi designado como semestre de primavera-verão enquanto o semestre mais chuvoso, como semestre de outono-inverno.

Tendo-se identificado o método de estimativa da ETo com base apenas em temperatura (Hargreaves-Samani, Camargo-71 e Blaney-Criddle) de melhor desempenho, procedeu-se à sua calibração local, com base na minimização do EAM, empregando-se a ferramenta Solver do Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias mensais dos dados climáticos para os anos considerados no estudo são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que as temperaturas máximas, mínimas e médias são maiores nos meses de outubro a março, o mesmo ocorrendo para a insolação diária; os meses mais frios correspondem ao trimestre junho, julho e agosto, quando se observam, também, os maiores índices pluviométricos e os mais elevados valores de umidade relativa. Esses dados demonstram claramente a existência de duas “estações” distintas na microrregião de Garanhuns: uma que se inicia no mês de outubro e se encerra no mês de março, a qual apresenta maiores temperaturas e menores precipitações, e outra que se inicia em abril e vai até setembro, quando se observa comportamento inverso ao da primeira.

Na Figura 1 apresenta-se a variação das médias de evapotranspiração de referência diária, ETo , ao longo dos meses.

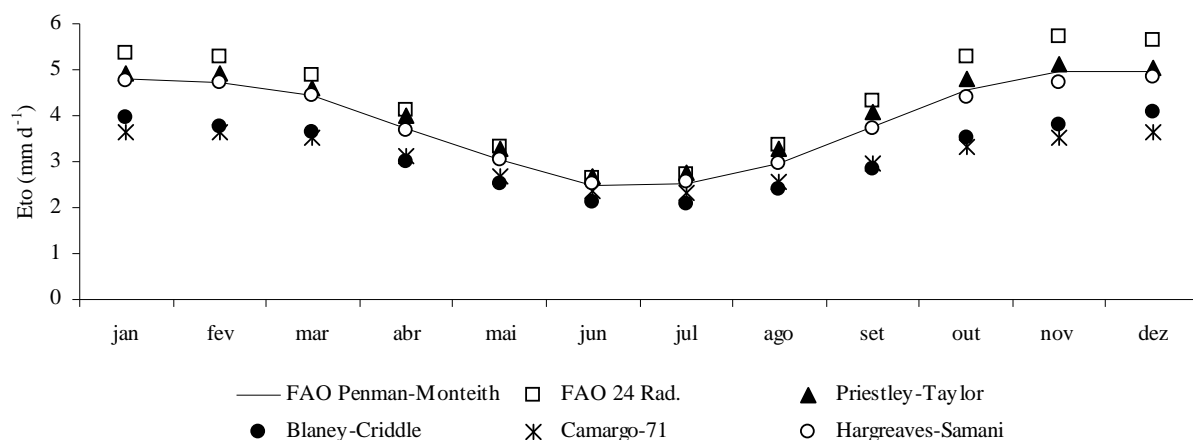


Figura 1. Médias mensais de evapotranspiração de referência (ETo), mm d^{-1} , obtidas pelos métodos considerados

Tabela 1. Médias mensais de dados climáticos para o conjunto de anos considerados

Mês	T_{\max}	T_{\min}	T_{med}	Precipitação (mm mês^{-1})	UR (%)	Veloc. vento (m s^{-1})	Insolação (h d^{-1})
	(°C)						
jan	28,9	18,5	22,6	46	76,3	3,7	7,5
fev	28,7	18,6	22,6	47	77,5	3,6	7,3
mar	28,5	18,8	22,6	70	80,1	3,5	6,8
abr	27,0	18,8	22,0	82	83,9	3,1	6,2
mai	25,3	18,2	21,0	106	87,9	3,0	5,4
jun	23,3	17,3	19,6	163	90,6	3,1	4,1
jul	22,6	16,5	18,8	140	91,2	3,2	4,2
ago	23,2	16,2	18,9	102	89,7	3,3	5,1
set	25,0	16,6	19,8	58	84,7	3,5	6,5
out	27,2	17,3	21,1	24	78,8	3,9	7,7
nov	28,4	17,9	22,0	18	75,6	4,3	8,4
dez	29,1	18,2	22,6	41	73,6	4,1	8,2

Observa-se, nesta figura, um ajuste melhor dos métodos de Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani ao método padrão, sobrestimativa do método FAO-24 Radiação e subestimativas obtidas com os métodos Camargo-71 e Blaney-Criddle, sendo as sobrestimativas e subestimativas mais pronunciadas nos meses de maior demanda evapotranspirométrica, que na região em estudo coincidem com o período mais seco do ano, ou seja, semestre primavera-verão.

Utilizando dados de postos meteorológicos situados na bacia do Rio Jacupiranga, SP, Borges & Mediondo (2007) verificaram, ao investigar a acurácia dos métodos de estimativa da ETo, dentre eles Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e Camargo-71, em comparação com o método padrão FAO Penman-Monteith, que o método Hargreaves-Samani apresentou o menor erro padrão de estimativa (%) e, também,

subestimativas pelo método Blaney-Criddle em praticamente todo o ano, com maiores erros ocorrendo na estação seca, similarmente ao que se observa na Figura 1. O método de Camargo-71 acarretou, naquele estudo, baixos erros nos meses mais chuvosos e maiores nos meses mais secos, também similar ao que se observa na Figura 1.

Os resultados das comparações em base diária são apresentados nas Tabelas 2 e 3 e nas Figuras 2 e 3 para os semestres primavera-verão e outono-inverno, respectivamente. Com base no erro absoluto médio, EAM, os métodos foram ranqueados na seguinte ordem: Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, FAO-24 Radiação, Blaney-Criddle e Camargo-71. O ranque é idêntico nos dois semestres, embora seja este alterado, conforme a estatística considerada. O método FAO-24 Radiação proporcionou os coeficientes mais

Tabela 2. Comparação dos métodos avaliados com o método padrão FAO Penman-Monteith para o semestre primavera-verão

	FAO P-M	FAO-24 Radiação	Priestley Taylor	Blaney Criddle	Camargo 71	Hargreaves Samani	Hargreaves Samani calib.
Média (mm)	4,7	5,40	4,90	3,80	3,60	4,70	4,80
S _d (mm)	0,96	1,37	0,94	0,63	0,24	0,58	0,84
CV	20%	26%	19%	17%	7%	13%	17%
Máximo (mm)	7,4	8,10	6,60	6,00	4,90	6,50	7,70
Mínimo (mm)	1,7	1,70	2,30	1,30	2,80	1,60	1,00
r		0,96	0,92	0,83	0,49	0,84	0,84
EAM (mm)		0,72	0,34	0,98	1,30	0,48	0,40
EQM (mm ²)		0,67	0,17	1,19	2,15	0,33	0,27
REQM (mm)		0,82	0,42	1,09	1,47	0,57	0,52
EQMs (mm ²)		0,51	0,04	1,07	2,11	0,23	0,07
EQMns (mm ²)		0,15	0,14	0,12	0,04	0,10	0,20
REQMs (mm)		0,72	0,19	1,04	1,45	0,48	0,26
REQMns (mm)		0,39	0,37	0,35	0,21	0,32	0,45
EQMs/EQM		77%	21%	90%	98%	69%	25%
EQMns/EQM		23%	79%	10%	2%	31%	75%
d		0,88	0,95	0,69	0,49	0,86	0,91
C		0,85	0,87	0,57	0,24	0,72	0,77

* N_p = 2733 pares de dados; S_d - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; R - coeficiente de correlação; EAM - erro absoluto médio; EQM - erro quadrado médio; REQM - raiz quadrada do erro quadrado médio; EQMs - erro quadrado médio sistemático; EQMns - erro quadrado médio não sistemático; REQM - raiz quadrada do erro quadrado médio sistemático; REQMns - raiz quadrada do erro quadrado médio não sistemático; EQMs/EQM - proporção sistemática de EQM; EQMns/EQM - proporção não sistemática de EQM; d - índice de concordância; C - índice de confiança

Tabela 3. Comparação dos métodos avaliados com o método padrão FAO Penman-Monteith, para o semestre outono-inverno

	FAO P-M	FAO-24 Radiação	Priestley Taylor	Blaney Criddle	Camargo 71	Hargreaves Samani	Hargreaves Samani calib.
Média (mm)	3,10	3,40	3,30	2,50	2,70	3,10	3,00
S _d (mm)	0,91	1,35	0,97	0,60	0,32	0,67	0,86
CV	30%	40%	29%	24%	12%	22%	28%
Máximo (mm)	6,40	7,00	5,60	4,80	3,90	5,40	6,30
Mínimo (mm)	1,30	1,10	1,80	1,00	2,00	0,80	0,40
r		0,98	0,97	0,90	0,70	0,90	0,90
EAM (mm)		0,50	0,31	0,61	0,68	0,36	0,31
EQM (mm ²)		0,37	0,13	0,55	0,69	0,18	0,16
REQM (mm)		0,61	0,36	0,74	0,83	0,43	0,40
EQMs (mm ²)		0,28	0,07	0,48	0,64	0,10	0,02
EQMns (mm ²)		0,09	0,06	0,07	0,05	0,09	0,14
REQMs (mm)		0,53	0,26	0,69	0,80	0,31	0,15
REQMns (mm)		0,30	0,25	0,27	0,23	0,30	0,37
EQMs/EQM		76%	53%	87%	92%	52%	15%
EQMns/EQM		24%	47%	13%	8%	48%	85%
d		0,93	0,96	0,87	0,77	0,94	0,95
C		0,91	0,93	0,78	0,54	0,84	0,86

* N_p = 2745 dados; S_d - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; R - coeficiente de correlação; EAM - erro absoluto médio; EQM - erro quadrado médio; REQM - raiz quadrada do erro quadrado médio; EQMs - erro quadrado médio sistemático; EQMns - erro quadrado médio não sistemático; REQM - raiz quadrada do erro quadrado médio sistemático; REQMns - raiz quadrada do erro quadrado médio não sistemático; EQMs/EQM - proporção sistemática de EQM; EQMns/EQM - proporção não sistemática de EQM; d - índice de concordância; C - índice de confiança

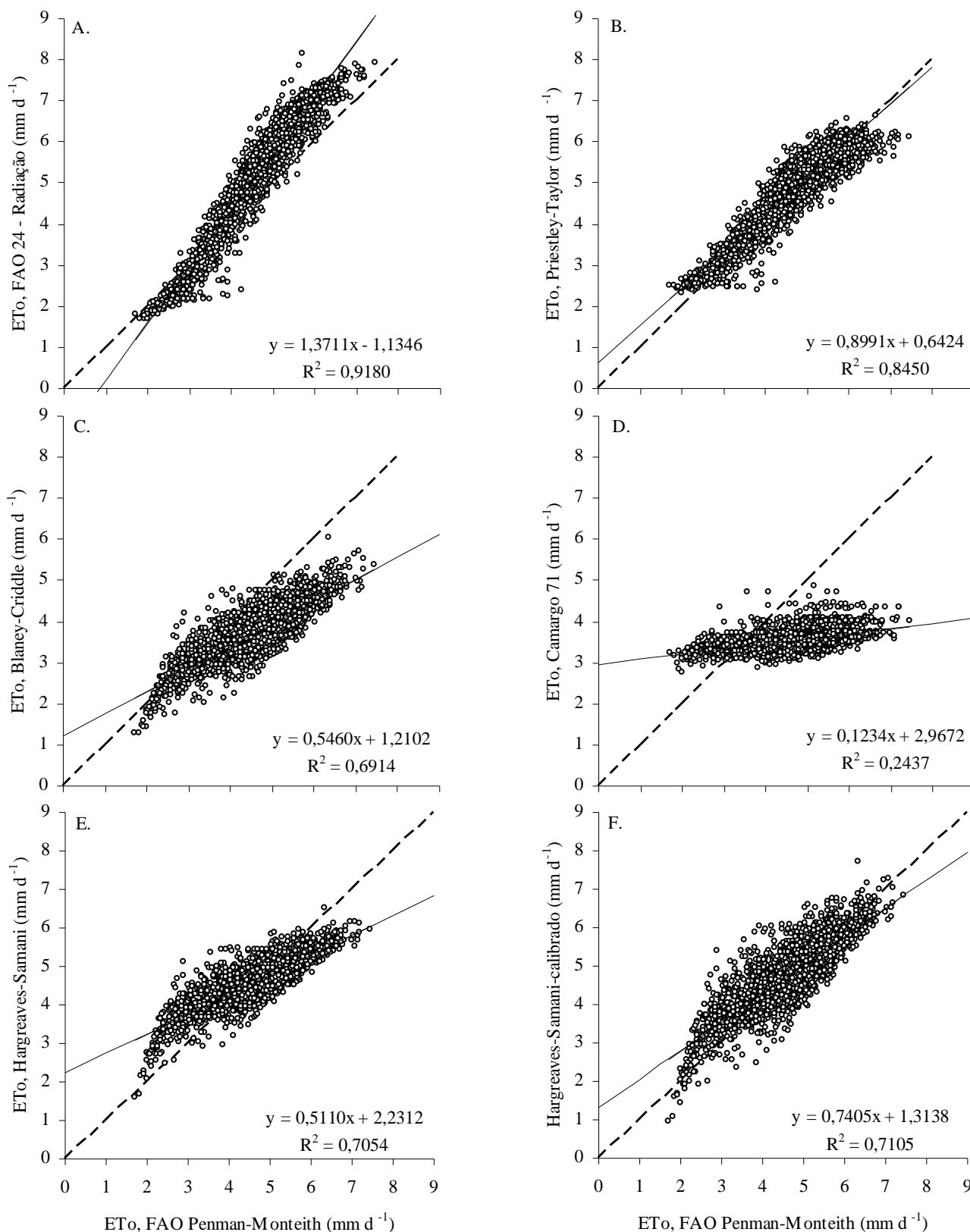


Figura 2. Evapotranspiração de referência diária, E_{To} , para o semestre primavera-verão: método FAO Penman-Monteith versus métodos avaliados, comparados por regressão linear (linha tracejada indica reta 1:1)

elevados de correlação e foi o segundo no ranque, com base no índice de confiança, C.

O método FAO-24 Radiação propiciou elevados valores do coeficiente de correlação e índice de concordância, o que refletiu

nos valores dos índices de confiança, C, iguais a 0,85 e 0,91, respectivamente, para os semestres primavera-verão e outono-inverno, classificando-se como de desempenho “ótimo”, conforme critério de Camargo & Sentelhas (1997). Valores de EAM iguais a

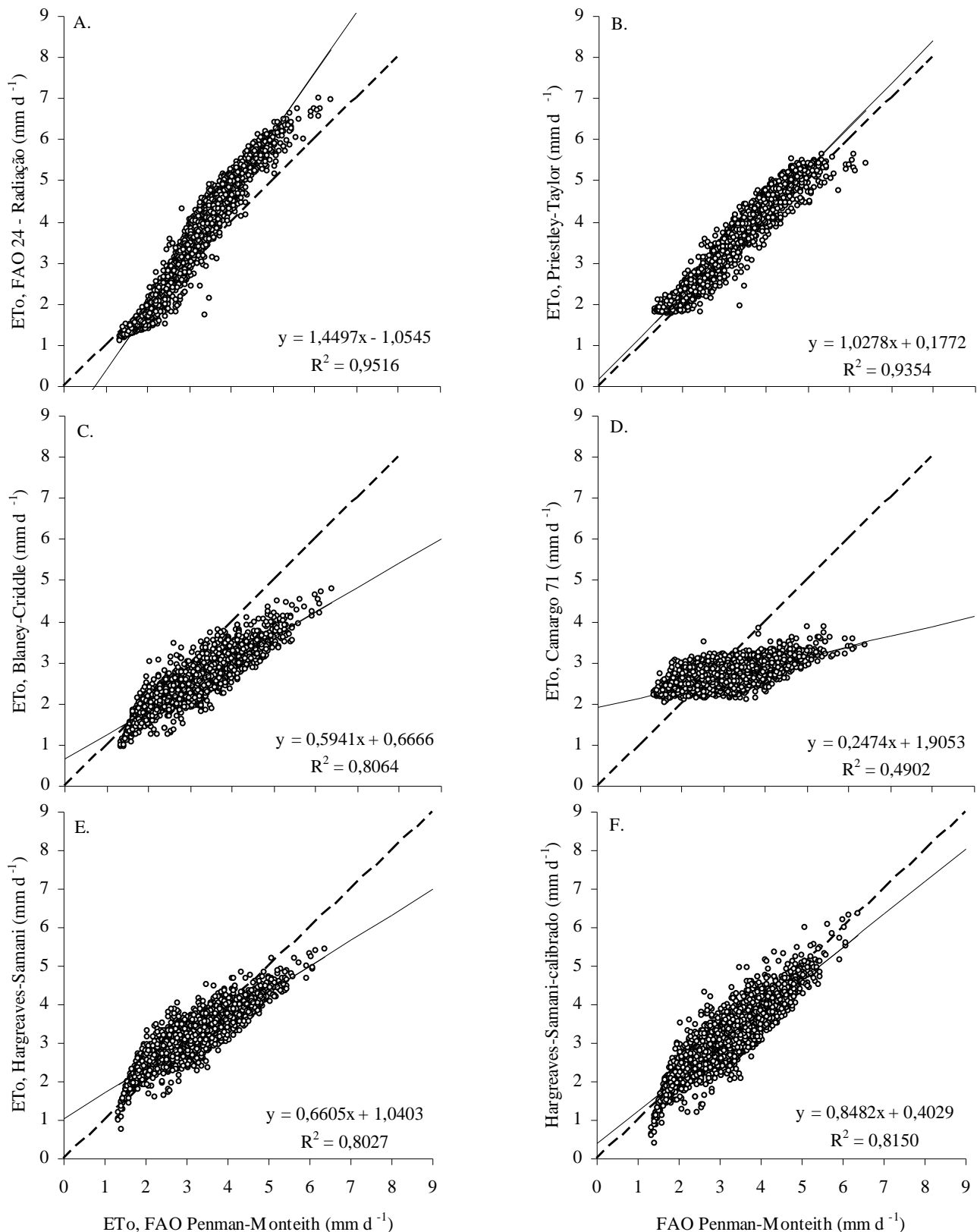


Figura 3. Evapotranspiração de referência diária, E_{To} , para o semestre outono-inverno: método FAO Penman-Monteith versus métodos avaliados, comparados por regressão linear (linha tracejada indica reta 1:1)

0,72 e 0,50 e de REQM iguais a 0,82 e 0,61 mm d^{-1} foram obtidos para os dois semestres (Tabelas 2 e 3). Jensen et al. (1990) apresentam valores de erro padrão de estimativa médios iguais a 0,64 para locais áridos e 0,81 mm d^{-1} para locais úmidos, sendo que

este parâmetro tende à REQM com o aumento do número de dados, o que o torna, portanto, passível de comparação.

Nas Figuras 2A e 3A observa-se o ótimo ajuste do método FAO-24 Radiação em comparação com o método FAO Penman-

Monteith, com coeficientes de determinação, R^2 , iguais a 0,9180 e 0,9516, para os semestres primavera-verão e outono-inverno, respectivamente. Mendonça & Dantas (2010) empregaram um método de Radiação similar ao aqui apresentado para estimativa da ETo em base diária no município de Capim, PB, e obtiveram valores de R^2 variando de 0,88 a 0,96. Oliveira et al. (2008) utilizaram o método da radiação solar em bacia experimental do riacho gameleira (Vitória de Santo Antão, PE) e encontraram que a ETo diária obtida por este método foi a que mais se ajustou aos valores obtidos num lisímetro de pesagem hidráulica.

Observa-se, nas Tabelas 2 e 3, que o método Priestley-Taylor, com base em dados de radiação, proporcionou o menor erro absoluto médio, EAM, dentre todos os avaliados, nos semestres de primavera-verão e de outono-inverno, com valores iguais a 0,34 e 0,31, respectivamente. Obtiveram-se valores elevados de coeficiente de correlação ($r = 0,92$ e $r = 0,97$) e índices de concordância ($d = 0,95$; $d = 0,96$) e, conseqüentemente, de confiança ($C = 0,87$; $C = 0,93$), o que indica desempenho “ótimo”, sendo seu uso indicado como alternativa ao método FAO Penman-Monteith na ausência de dados de velocidade de vento, para a microrregião de Garanhuns, PE, no Agreste Meridional Pernambucano.

Em estudo aplicado no estado da Geórgia (EUA) e comparando os métodos Priestley-Taylor e FAO Penman-Monteith, Suleiman & Hoogenboom (2007) encontraram valores de d variando de 0,95 a 0,99. Fietz & Fisch (2009) verificaram desempenho “muito bom” deste método, com $C = 0,78$, com tendência de sobrestimativa, na região de Dourados, MS.

O ótimo desempenho do método Priestley-Taylor é corroborado por meio da análise das Figuras 2B e 3B, observando-se coeficientes linear, angular e de determinação, obtidos na regressão. Encontraram-se valores de R^2 iguais a 0,845 e 0,935 nos dois semestres, enquanto Silva et al. (2005) encontraram valores de 0,91 e 0,42 em dois meses analisados no ano de 2002, em Petrolina, PE.

Para o método de Blaney-Criddle, Camargo & Sentelhas (1997) obtiveram C igual a 0,59, comparável ao obtido para o semestre primavera-verão neste estudo ($C = 0,57$ - classificação: “sofrrível”) e inferior ao obtido para o semestre outono-inverno ($C = 0,78$ - classificação: “muito bom”), conforme se observa nas Tabelas 2 e 3. Jensen et al. (1990) apresentam valores de erro padrão de estimativa médios iguais a 0,66 e 0,71 mm d^{-1} , para locais áridos e úmidos, em diferentes continentes, inferiores aos valores de REQM iguais a 1,09 e 0,74 mm d^{-1} , para os semestres primavera-verão e outono-inverno, verificados neste estudo. Também se verificam, nas Tabelas 2 e 3, porções sistemáticas elevadas do EQM (90 e 87%), indicando que a calibração de coeficientes deve acarretar considerável melhoria de desempenho do método, tendendo a aproximar, para a unidade, os coeficientes angulares das retas de regressão iguais a 0,5460 e 0,5941 (Figuras 2C e 3C). Nota-se que a aplicação deste método é mais laboriosa que a dos outros dois métodos baseados em temperatura e considerados neste trabalho (Camargo-71 e Hargreaves-Samani).

Para o método Camargo-71, Camargo & Sentelhas (1997) obtiveram elevado C , divergindo em relação ao estudo aqui

apresentado, no qual se obteve C igual a 0,24 e 0,54, para os semestres primavera-verão e outono-inverno, respectivamente. Para este método se observa, nas Tabelas 2 e 3, a baixa amplitude entre valores máximos e mínimos em relação ao método FAO Penman-Monteith; nelas também se verifica que a porção sistemática do erro quadrado médio (EQMs/EQM) foi de 98 e 92%, respectivamente, para os semestres primavera-verão e outono-inverno, indicando um elevado potencial de melhoria com a calibração do coeficiente K (Eq. 10), o que se percebe nas Figuras 2D e 3D. Syperreck et al. (2008) encontraram valores de r , d e C iguais a 0,86, 0,84 e 0,72, utilizando dados diários para a região de Palotina, PR. O valor de C encontrado por esses autores foi consideravelmente superior aos aqui obtidos para os dois semestres, o que sinaliza a forte necessidade de calibração local do método.

Dentre os métodos com base em temperatura, aquele que gerou menor EAM foi o de Hargreaves-Samani, para o qual foi executada a calibração. A calibração consistiu, a rigor, em modificação dos coeficientes A_{HS} e C_{HS} e do expoente B_{HS} , obtendo-se valores que proporcionassem a minimização de EAM, com base na equação:

$$ETo = A_{HS} R_a (T_{max} - T_{min})^{B_{HS}} (T_{med} + C_{HS}) \quad (18)$$

Utilizando como os valores de partida $A_{HS} = 0,0023$, $B_{HS} = 0,5$ e $C_{HS} = 17,8$ (Eq. 11), obtiveram-se, com a ferramenta Solver (Excel), os seguintes valores calibrados: $A_{HS} = 0,0013$, $B_{HS} = 0,76$, $C_{HS} = 17,76$, para o semestre primavera-verão e $A_{HS} = 0,0014$, $B_{HS} = 0,74$, $C_{HS} = 17,79$, para o semestre outono-inverno. Os valores foram truncados para quatro casas decimais para A_{HS} e duas para B_{HS} e C_{HS} .

Os resultados obtidos com o método Hargreaves-Samani calibrado são apresentados nas Tabelas 2 e 3 e nas Figuras 2F e 3F. A calibração do método de Hargreaves-Samani acarretou redução em EAM de 0,48 para 0,40, no semestre primavera-verão e de 0,36 para 0,31, no semestre de outono-inverno. A calibração também possibilitou a melhoria em outras estatísticas, como o índice de concordância, d , e o índice de confiança, C , este último aumentado de 0,72 para 0,77 no semestre primavera-verão e de 0,84 para 0,86 no semestre outono-inverno. Com base no coeficiente de variação (CV), observa-se que a dispersão em torno da média após calibragem, também se aproximou dos valores verificados para o método padrão: o CV aumentou de 13 para 17% no semestre primavera verão e de 22 para 28% no semestre outono inverno. Nesses períodos os valores de CV foram iguais, respectivamente, a 20 e 30% para o método FAO Penman-Monteith. Assim, recomenda-se a aplicação do método de Hargreaves-Samani, com coeficientes e expoente calibrados, na microrregião de Garanhuns, PE, quando apenas dados de temperatura máxima, mínima e média forem disponíveis.

Constata-se também, como consequência da calibração do método Hargreaves-Samani, uma drástica alteração nas proporções sistemáticas e não sistemática do EQM. A porção sistemática foi reduzida de 69 para 25% e de 52 para 15%, respectivamente nos semestres primavera-verão e outono-inverno. Com base em Willmott (1982) e com respeito a um

“bom” modelo, a REQM deve ser próxima a zero enquanto a REQMn deve ser próxima a REQM, com o objetivo de representar as principais tendências ou padrões nos valores observados que, neste caso, são valores estimados com o método FAO Penman-Monteith.

Visando reduzir sobrestimativas com o método Hargreaves-Samani em clima úmido, Trajkovic (2007) encontrou o valor do expoente B_{HS} igual a 0,424, calibrado para a região dos Balcãs Ocidentais, no sudeste da Europa, com erro padrão de estimativa, SEE, variando de 0,17 a 0,24 mm d⁻¹, em relação ao método FAO Penman-Monteith, inferiores aos valores de REQM aqui encontrados: 0,52 e 0,40 mm d⁻¹, respectivamente, para os semestres primavera-verão e outono-inverno. Esta diferença decorre, sem dúvida, das ambiguidades inerentes ao SEE e à REQM, em que se potencializam maiores diferenças entre P_i e O_i (Eq. 13), geralmente atreladas a maiores valores de ETo. Observa-se que patamares de ETo consideravelmente maiores foram obtidos para Garanhuns em relação à região estudada por Trajkovic (2007).

Borges & Mediondo (2007) obtiveram, após procedimento de calibração, C consideravelmente superior para o método de Hargreaves-Samani, chegando a alcançar 0,996. Camargo & Sentelhas (1997), em estudo para o Estado de São Paulo, no qual empregaram dados decendiais de lisímetros, totalizados em base mensal para estimar a evapotranspiração potencial da grama batatais, obtiveram C igual a 0,71 com o método de Hargreaves modificado. Syperreck et al. (2008) encontraram valor de C igual a 0,73, próximo ao referido neste trabalho, para o semestre primavera-verão.

Silva et al. (2005) encontraram coeficientes de determinação, R², iguais a 0,66 e 0,62 empregando o método de Hargreaves-Samani em dados diários dos meses de março e agosto de 2002, para Petrolina, PE, tendo recomendado o emprego deste método na ausência de dados de insolação e velocidade do vento. Já Oliveira et al. (2008) encontraram, comparando os valores de ETo diários obtidos por este método e por lisímetro de pesagem hidráulica, valores de R² de 0,69 em Vitória de Santo Antão, PE. Os valores de R² aqui encontrados para o método Hargreaves-Samani calibrado foram 0,7105 e 0,8150, nos semestres primavera-verão e outono-inverno, respectivamente. A calibração proporcionou uma aproximação do coeficiente angular da regressão para a unidade: no semestre primavera-verão passou de 0,5110 para 0,7405 enquanto no semestre outono-inverno passou de 0,6605 para 0,8482. O melhor ajuste da reta de regressão à reta 1:1, obtido com a calibração, é também percebido comparando-se as Figuras 2E e F e as Figuras 3E e F.

CONCLUSÕES

1. Dentre os métodos avaliados verificou-se que o melhor desempenho foi obtido com o método de Priestley-Taylor, com base nos valores do erro médio absoluto, EAM, e no coeficiente de confiança, C.

2. Em relação aos métodos com requerimento apenas de dados de temperatura, o de Hargreaves-Samani calibrado foi o que apresentou o melhor desempenho.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. Moscow: University of Idaho, 2000. 76p.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 301p. Irrigation and Drainage, Paper 56.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009. Brasília: ANA, 2009. 204p.
- Andrade, C. L. T.; Borges Júnior, J. C. F. Seleção do método de irrigação. In: Albuquerque, P. E. P.; Durães, F. O. M. Uso e manejo de irrigação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p.317-400.
- Borges, A. C.; Mediondo, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, p.293-300, 2007.
- Camargo, A. P.; Camargo, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, v.59, p.125-37, 2000.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, p.89-97, 1997.
- Choudhary, O. P.; Ghuman, B. S.; Dhaliwal, M. S. Yield and quality of two tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars as influenced by drip and furrow irrigation using waters having high residual sodium carbonate. Irrigation Science, v.28, p.513-523, 2010.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Guidelines for predicting cropwater requirements. Rome: FAO, 1975. 179p. Irrigation and Drainage, Paper 24.
- Fietz, C. R.; Fisch, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.449-53, 2009.
- Jensen, M. E.; Burman, R. D.; Allen, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332p.
- Mendonça, E. A.; Dantas, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.196-202, 2010.
- Oliveira, L. M. M.; Montenegro, S. M. G. L.; Azevedo, J. R. G.; Santos, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.3, p.58-67, 2008.
- Pereira, A. R.; Nova, N. A. V.; Sediyaama, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183p.
- Sediyaama, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.4, p.1-12, 1996.
- Silva, V. P. R.; Belo Filho, A. F.; Silva, B. B.; Campos, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, p.547-53, 2005.

- Sousa, I. F. de; Silva, V. de P. R. da; Sabino, F. G.; Netto, A. de O. A.; Silva, B. K. N.; Azevedo, P. V. de. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.633-644, 2010.
- Suleiman, A. A.; Hoogenboom, G. Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for Daily Reference Evapotranspiration Estimation in Georgia. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 133, p.175-82, 2007.
- 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*, v.30, p.603-609, 2008.
- Trajkovic, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 133, p.38-42, 2007.
- Vega, E. C.; Jara, J. C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola*, v.29, p.390-403, 2009.
- Willmott, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, v.30, p.1309-1310, 1982.
- Willmott, C. J.; Matsuura, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, v.30, p.79-82, 2005.