

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM FUNÇÃO DOS EXTREMOS DA TEMPERATURA DO AR NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

ANDERSON AMORIM ROCHA SANTOS¹; GUSTAVO BASTOS LYRA²; GUILHERME BASTOS LYRA³; EVALDO PAIVA LIMA⁴; JOSÉ LEONALDO DE SOUZA⁵ E RAFAEL COLL DELGADO²

¹ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Engenharia de Biossistemas, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense – UFF, Campus da Praia Vermelha, 24210-240, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: aamorimrs@gmail.com

² Meteorologistas, Professores Doutores do Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus UFRRJ, 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: gblyra@ufrj.br; rafaelcolldegado32@gmail.com

³ Engenheiro Agrônomo, Professor Doutor do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas – UFAL, BR-104, 57100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil, e-mail: gbastoslyra@gmail.com

⁴ Meteorologista, Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Rua Jardim Botânico 1024, 22460-000, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: evaldo.lima@embrapa.br

⁵ Meteorologista, Professor Doutor do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas – UFAL, BR-104, 57100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil, e-mail: leonaldojs@yahoo.com.br

1 RESUMO

A aplicação do método de Penman-Monteith FAO56 (PM-FAO56) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) requer observações de diversos elementos meteorológicos. A maior parte das estações meteorológicas não realiza medidas de todos os elementos, o que restringe a aplicação do PM-FAO56. O objetivo foi avaliar o desempenho dos métodos empíricos de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink na estimativa de ET_0 em função dos extremos de temperatura do ar no estado do Rio de Janeiro (RJ). Foram utilizadas séries meteorológicas entre oito e 34 anos de 10 estações convencionais pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia localizadas no RJ. As estimativas decendiais e mensais de ET_0 pelos métodos empíricos foram comparadas com ET_0 determinada por PM-FAO56 (padrão) para se avaliar a exatidão (Erro Padrão de Estimativa - EPE e Índice de Willmott - d), precisão (coeficiente de determinação - R^2) e o desempenho (índice c de Camargo e Sentelhas) dos métodos. Independente da escala de tempo avaliada, o método de Makkink mostrou estimativas com maior exatidão ($d > 0,82$ e $EPE < 0,68$ mm d^{-1}), precisão ($R^2 > 0,88$) e desempenho (índice $c > 0,85$) nas estações caracterizadas com clima úmido, subúmido, subúmido seco com pequeno excedente hídrico. Nas demais estações, clima subúmido seco com excedente nulo e semiárido, o método de Hargreaves-Samani teve melhor desempenho (índice $c > 0,85$). Os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram estimativas com exatidão ($d > 0,90$ e $EPE < 0,72$ mm d^{-1}) e desempenho (índice $c > 0,76$) entre os melhores e podem ser usados para estimativa de ET_0 no RJ. As menores exatidões ($d < 0,73$ e $EPE > 1,38$ mm d^{-1}) e desempenhos ($0,51 < \text{índice } c < 0,75$) das estimativas foram proporcionadas por Jensen-Haise para todas as estações e escalas de tempo, não sendo recomendado sua aplicação no estado do RJ. Os métodos de Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink devem ser ajustados às condições climáticas do RJ.

Palavras-Chave: Penman-Monteith, radiação solar global, amplitude térmica

**SANTOS, A. A. R.; LYRA, G.B.; LYRA, G.B.; LIMA, E. P.; SOUZA, J. L.; DELGADO, R. C.
ESTIMATES OF THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION USING AIR
TEMPERATURE EXTREMES IN THE STATE OF THE RIO DE JANEIRO,
SOUTHEASTERN BRAZIL**

2 ABSTRACT

The use of the Penman-Monteith FAO56 method (PM-FAO 56) to estimate reference evapotranspiration (ET_0) requires several weather elements. However, most weather stations don't measure all the elements, which restricts the application of PM-FAO 56. The aim of this article was to evaluate the performance of five empirical methods (Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise and Makkink) to estimate ET_0 using air temperature extremes in the state of the Rio de Janeiro (RJ). Times series of weather elements between eight and 34 years from 10 conventional stations of the Brazilian National Institute of Meteorology located in RJ were used. The ten-day and monthly estimates of ET_0 by empirical methods were compared to ET_0 determined by PM-FAO 56 (default) to evaluate the accuracy (Standard Error of the Estimate - SEE and Willmott index - d), precision (coefficient of determination - R^2) and performance (Camargo and Sentelhas - c Index) of the methods. Independent of the time scale, the Makkink method showed the highest accuracies ($d > 0.82$ and $SEE < 0.68 \text{ mm d}^{-1}$), precision ($R^2 > 0.88$) and performance ($c \text{ Index} > 0.85$) on the stations, characterized with humid, sub-humid, dry sub-humid with small water surplus. For the other stations, semiarid and dry sub-humid climate with no surplus, the Hargreaves-Samani method had the best performance ($c \text{ Index} > 0.85$). The Thornthwaite and Camargo methods presented accuracy ($d > 0.90$ and $SEE < 0.72 \text{ mm d}^{-1}$) and performance ($c \text{ Index} > 0.76$) between the top and can be used to estimate ET_0 in RJ. For all stations and time scales, the worst accuracies ($d < 0.73$ and $SEE > 1.38 \text{ mm d}^{-1}$) and performance ($0.51 < c \text{ Index} < 0.75$) estimates were provided by the Jensen-Haise method, so it is not recommended its application in RJ state. The Hargreaves-Samani, Jensen-Haise and Makkink methods should be fitted to the climatic conditions of RJ.

Keywords: Penman-Monteith, solar global radiation, temperature amplitude

3 INTRODUÇÃO

No projeto e manejo de sistemas de irrigação e drenagem é necessário o conhecimento dos componentes do balanço hídrico (BH) no sistema solo-vegetação-atmosfera, principalmente a precipitação e evapotranspiração (ET). Com base nesses componentes e práticas agrícolas pode-se maximizar o uso dos recursos hídricos disponíveis e potencializar a produtividade agrícola, com o mínimo impacto ambiental (LYRA et al., 2010). Os componentes do BH subsidiam também estudos hidrológicos e climáticos (BAKHTIARI et al., 2011; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013), como por exemplo, a classificação climática de Thornthwaite (1948), o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), a ocorrência de secas (PALMER, 1965) e a susceptibilidade a desertificação (GOIS et al., 2005).

Nos estudos acima é fundamental a determinação da evapotranspiração de referência (ET_0) ou a potencial (ETP) (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). Em aplicações práticas, normalmente ET_0 ou ETP são estimadas por métodos empíricos ou físico-fisiológicos, em função de elementos meteorológicos de superfície. Dentre os diversos métodos de estimativa de ET_0 , a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture Organization* – FAO) recomenda como padrão o método de Penman-Monteith (PM) parametrizado para uma cultura hipotética no seu boletim N° 56 de irrigação e drenagem - PM-FAO56 (ALLEN et al., 1998).

Na aplicação do método de PM-FAO56 são necessários diversos elementos meteorológicos (radiação solar, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento). Esses elementos são difíceis de serem medidos na maioria das estações meteorológicas, devido, principalmente, ao alto custo de implantação e manutenção dos instrumentos meteorológicos (SENTELHAS; GILLESPIE; SANTOS, 2010; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013). Na maioria das estações são disponíveis apenas observações de temperatura do ar e precipitação, o que compromete a aplicação do método de PM-FAO56.

Outro problema é a baixa densidade de estações meteorológicas no país, ou em alguns casos a restrição, por empresas públicas ou privadas, ao acesso às séries dos elementos meteorológicos. Santos (2013) avaliou cinco métodos empíricos de estimativa de ET_o para o estado do Rio de Janeiro, e verificou a existência de doze estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com observações de superfície necessárias à aplicação do método PM-FAO56, sendo que dessas, apenas nove tinham séries climáticas superiores a 10 anos. No estado do Rio de Janeiro, Araújo et al. (2010) identificaram apenas vinte estações do INMET e da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) com observações de temperatura do ar com longas séries (> 15 anos) para estudos climáticos. As restrições de observações e, ou de estações meteorológicas dificultam a aplicação do método PM-FAO56 e mesmo de métodos empíricos baseados apenas na temperatura do ar e, ou na radiação solar.

Na impossibilidade de aplicação do método de PM-FAO56, o boletim FAO56 recomenda para estimativa de ET_o o método empírico de Hargreaves e Samani (1982; 1985). O boletim também sugere que os métodos empíricos sejam ajustados para outras regiões por meio de medidas diretas de ET (lisimétricas) e na indisponibilidade dessas medidas, pode-se considerar o método de PM-FAO56 como padrão (ALLEN et al., 1998; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013). Entre os métodos empíricos, a exemplo dos baseados apenas na temperatura do ar, Thornthwaite (THORNTWHAITE, 1948) e Camargo (CAMARGO, 1971), são utilizados com maior frequência (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). Esses métodos são denominados também de métodos de dados climáticos mínimos, sendo de aplicação prática e simples.

Para simplificar as estimativas de ET_o pelo método original de Hargreaves e Samani (1982), Hargreaves e Samani (1985) propuseram um método para estimativa da radiação solar global (R_s), em função apenas da amplitude térmica e da radiação solar extraterrestre (R_a). Estimativas de R_s por esse método podem ser usadas na determinação de ET_o por outros métodos baseados na radiação solar, tais como, Jensen-Haise (JENSEN e HAISE, 1963) e Makkink (MAKKINK, 1957), sendo necessário para isso, apenas os extremos de temperatura do ar (temperatura do ar máxima e mínima).

Baseado no exposto, os objetivos são: i) propor um método para estimar a evapotranspiração de referência pelos métodos de Jensen-Haise e Makkink em função apenas nos extremos de temperatura do ar e radiação solar extraterrestre e ii) avaliar os métodos de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink para estimativa de evapotranspiração de referência em relação ao método de Penman-Monteith FAO56 no estado do Rio de Janeiro.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) decendial e mensal utilizaram-se séries climáticas de dez estações meteorológicas convencionais de superfície, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas no estado do Rio de Janeiro, região Sudeste (SE) do Brasil, entre os meridianos $40^{\circ} 57' 59''$ W e $44^{\circ} 53' 18''$ W e os paralelos $20^{\circ} 45' 54''$ S e $23^{\circ} 21' 57''$ S (Figura 1). O Estado faz divisa a nordeste com o estado do Espírito Santo, a norte e noroeste com o estado de Minas Gerais, a sudoeste com São Paulo e a sul e leste com o Oceano Atlântico.

A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam informações relativas a cada uma das estações meteorológicas do estudo. A qualidade dos dados foi verificada de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), no seu relatório técnico N° 258 para os dados na escala decenal e mensal (WMO, 2006).

Figura 1. Localização das estações utilizadas no estudo.

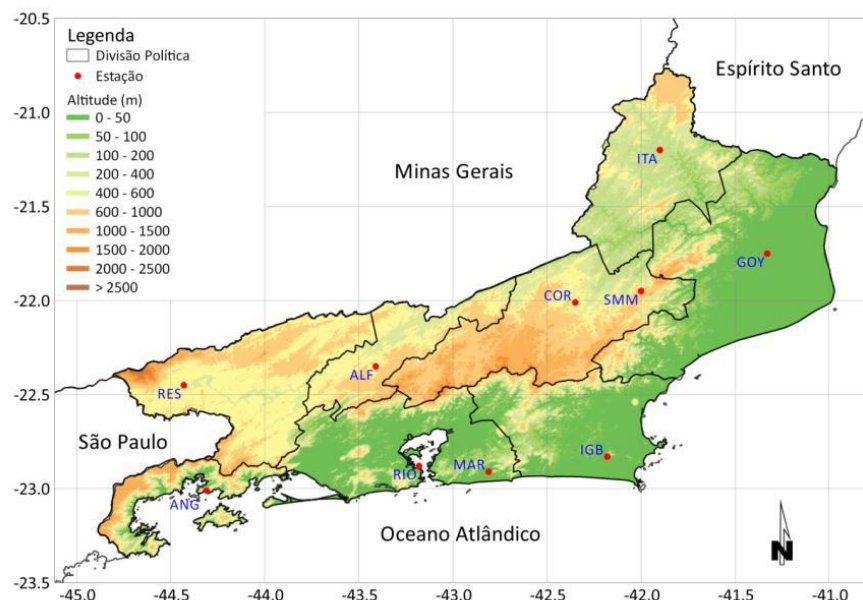


Tabela 1. Município, região, latitude (lat), longitude (long) e altitude (m) das estações meteorológicas no estado do Rio de Janeiro, classificação climática de Thornthwaite e período de observação (ano de início-fim e total de anos)

Município	ID	Região ¹	lat. (°)	long. (°)	alt. (m)	Classificação Climática ²	Período de observação	
							Início-Fim (anos)	Total (anos)
Paty do Alferes	ALF	Interior	-22,35	-43,41	507	C ₂ r B' ₄ a'	1992-2012	17
Maricá	MAR	Costa	-22,91	-42,81	4	C ₁ d A' a'	1993-2009	12
Iguaba Grande	IGB	Costa	-22,83	-42,18	6	D d A' a'	1992-2003	8
Itaperuna	ITA	Interior	-21,20	-41,9	124	C ₁ d A' a'	1967-2012	26
Santa Maria Madalena	SMM	Interior	-21,95	-42,00	620	B ₂ r B' ₃ a'	1961-1979	15
Campos dos Goytacazes	GOY	Interior	-21,74	-41,33	11	C ₁ d A' a'	1961-2000	28
Cordeiro	COR	Interior	-22,02	-42,36	506	B ₁ r B' ₄ a'	1971-2010	18
Resende	RES	Interior	-22,45	-44,44	440	B ₁ r B' ₄ a'	1961-2010	34
Rio de Janeiro	RIO	Costa	-22,89	-43,18	11	C ₁ d A' a'	1961-1983	19
Angra dos Reis	ANG	Costa	-23,01	-44,31	3	B ₃ r A' a'	1965-1983	15

¹ Interior ou costa caracterizada conforme Hargreaves (1994), para definir os coeficientes do método de Hargreaves e Samani (1985).

² Classificação climática de Thornthwaite: D - semiárido; C₁ - subúmido seco; C₂ - subúmido; B₁, B₂ e B₃ - úmido; r - deficiência hídrica pequena ou nula no inverno; d - excesso hídrico pequeno ou nulo no verão; A' - megatérmico; B'₃ e B'₄ - mesotérmico; a' - menos que 48 % da evapotranspiração potencial anual e observada no verão.

Os elementos meteorológicos medidos nas estações foram: insolação (n, horas), extremos diário da temperatura do ar (máxima – T_x e mínima – T_n, °C), umidade relativa do ar média diária (UR, %),

obtida a 1,5 m acima da superfície e a velocidade do vento (u_{10} , m s^{-1}) medida a 10 m de altura. A u_{10} foi posteriormente reduzida para 2 metros (u_2 , m s^{-1}) pela relação proposta por Allen et al. (1998). Nas estimativas de ET_o foram utilizadas médias decendiais e mensais desses elementos meteorológicos.

O método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO56 (PM-FAO56) para uma cultura hipotética (resistência da superfície de 70 s m^{-1} , altura uniforme de 0,12 m, índice de área foliar de 2,88 e albedo de 0,23), assume a seguinte forma para estimativa da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998):

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

em que, ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n é o saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); T_m [$=(T_x + T_n)/2$] é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a média da velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); DPV é a média do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa); s é a derivada da curva de pressão de saturação do vapor do ar no ponto de T_m ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Na escala decendial G foi considerado nulo, enquanto na mensal utilizou-se a relação: $G_{m,i} = 0,07 (T_{m,i+1} - T_{m,i-1})$, em que, o índice subscrito i representa o i -ésimo mês, como sugerido por Allen et al. (1998). Detalhes das estimativas dos componentes do saldo de radiação (R_n) com base na latitude e época do ano e nas medidas de insolação, temperatura e umidade do ar e dos componentes do termo aerodinâmico são apresentadas por Allen et al. (1998) e Lyra et al. (2004; 2007). Nessas estimativas, considerou-se o dia 15 de cada mês como representativo do mês ou o quinto dia de cada decêndio para representá-lo.

Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de evapotranspiração potencial (ETP), utilizando-a na proposição de uma nova classificação climática para a região do meio-oeste Americano. O método proposto por Thornthwaite (1948) apresenta a seguinte rotina de estimativa (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012):

$$ETP_p = 16 \left(10 \frac{T_{m,i}}{I} \right)^a \quad (2)$$

em que, ETP_p é a evapotranspiração padrão (mm d^{-1}) para um fotoperíodo (N) de 12 h e um mês de 30 dias; o índice subscrito i representa o i -ésimo mês do ano e I e a são índices térmicos regionais, os quais foram calculados a partir das médias mensais de T_m da série histórica disponível, limitada a $0^{\circ}\text{C} \leq T_m < 26,5^{\circ}\text{C}$, sendo determinados pelas relações:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{m,i}}{5} \right]^{1,514} \quad (3)$$

$$a = (6,75 \times 10^{-7} I^3) - (7,71 \times 10^{-5} I^2) + (1,7912 \times 10^{-2} I) + 0,49239 \quad (4)$$

Esses índices foram determinados com os valores médios das séries de temperatura do ar para cada mês e estação. Dessa forma, os índices I e a são característicos da região em estudo e não variam ano a ano.

Para converter ETP_p em ETP de um mês qualquer (com 28, 29, 30 ou 31 dias e fotoperíodo variável) é necessário multiplicá-la por um fator de correção adimensional (f) que considera o número de dias no mês (ND , dias/mês) e o fotoperíodo do local em determinado mês (N , horas/dia), ou seja:

$$ETP = ETP_P \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (5)$$

Visando a aplicação prática do balanço hídrico climatológico, e no intuito de simplificar as estimativas de ETP pelo método de Thornthwaite para períodos de 10 a 30 dias, Camargo (1971) propôs uma formulação empírica, testada posteriormente por Camargo e Camargo (1983) para algumas localidades do estado de São Paulo, para estimar ET_o baseado apenas na temperatura do ar média e na radiação solar extraterrestre, sendo expresso da seguinte forma:

$$ETP = F R_a T_m \quad (6)$$

em que, F é um fator de ajuste que varia com a temperatura do ar média do local, para um determinado período de tempo (decendial ou mensal), R_a é a radiação solar extraterrestre (mm d^{-1}). F assume o valor de 0,0100 quando T_m for $\leq 23^\circ\text{C}$, de 0,0105 para o intervalo de $23 \leq T_m \leq 24^\circ\text{C}$, de 0,0110 para o intervalo de $24 \leq T_m \leq 25^\circ\text{C}$, de 0,0115 para o intervalo de $25 \leq T_m \leq 26^\circ\text{C}$, e de 0,0120 para $T_m > 26^\circ\text{C}$. R_a ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foi determinada em função da latitude e época do ano pela relação apresentada por Allen et al. (1998). Para obter R_a em equivalente de evaporação (mm d^{-1}), multiplicou-se a mesma, em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, pelo inverso do calor latente de evaporação a 20°C ($1/\lambda = 0,408 \text{ kg MJ}^{-1}$).

O princípio do método de Hargreaves-Samani é a correlação entre ET_o , R_s (mm d^{-1}) e a temperatura do ar. O método foi proposto e testado para as condições climáticas semiáridas de Davis, no estado da Califórnia, EUA, com base em medidas lisimétricas. Quando a temperatura do ar é expressa em graus Celsius, o método de Hargreaves-Samani (1982) apresenta a seguinte forma:

$$ET_o = 0,0135 R_s (17,8 + T_m) \quad (7)$$

Posteriormente, em função da necessidade de se estimar ET_o em regiões desprovidas de medidas de R_s , Hargreaves e Samani (1985) propuseram um método de estimativa desse elemento climático em função da amplitude térmica mensal ($T_x - T_n$) e R_a expressa em equivalente de evaporação (mm d^{-1}):

$$R_s = k_r R_a (T_x - T_n)^{0,5} \quad (8)$$

Combinando as equações 7 e 8, obtêm-se a equação de Hargreaves e Samani (1985):

$$ET_o = 0,0135 k_r R_a (T_x - T_n)^{0,5} (17,8 + T_m) \quad (9)$$

O coeficiente empírico adimensional da equação 8, denominado k_r , foi ajustado para regiões continentais ($> 20 \text{ km}$ de distância da linha da costa) com o valor de 0,162, e para regiões litorâneas ($\leq 20 \text{ km}$) com valor de 0,19 (HARGREAVES, 1994; ALLEN, 1997).

O método de Jensen-Haise (JENSEN e HAISE, 1963) se baseia nos valores médios semanais de ET_o (mm d^{-1}) obtidos diariamente por meio de medidas no lisímetro de Davis, CA, ao longo de dois anos e meio (1959–1961) (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). Esse método apresenta base conceitual semelhante ao considerado por Hargreaves e Samani (1982; 1985), porém com pequena diferença. No método de Jensen-Haise foi avaliado o efeito da temperatura do ar sobre a razão ET_o/R_s . Desta relação obteve-se uma equação que permite estimar ET_o (mm d^{-1}) com medidas de R_s (mm d^{-1}):

$$ET_o = R_s (0,0252 T_m + 0,078) \quad (10)$$

Jensen e Haise (1963) constataram que o método original proposto por eles superestimou ET_o em até 15% nos períodos mais quentes e secos do verão de Davis, CA, que é a época de maior demanda hídrica regional.

Combinando as equações 8 e 10, obtêm-se o método de Jensen-Haise modificado no presente trabalho, sendo função apenas dos extremos de temperatura do ar:

$$ET_o = k_r R_a (T_x - T_n)^{0,5} (0,0252 T_m + 0,078) \quad (11)$$

Makkink (1957) ajustou uma regressão linear entre ET_o , medida em lisímetros gramados, e o termo diabático, relacionado a radiação solar, da equação de Penman, substituindo o saldo de radiação por R_s . Originalmente, o trabalho de Makkink considerou a escala de tempo mensal e da regressão resultou a equação que se tornou conhecida como método de Makkink:

$$ETP = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (12)$$

em que, W é um fator de ponderação (adimensional), dependente da temperatura do bulbo úmido e do coeficiente psicrométrico, que pode ser estimado em função da temperatura do bulbo úmido (T_u , °C) (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997) pelas seguintes relações:

$$W = 0,407 + 0,145 T_u \quad \text{para } 0 < T_u \leq 16 \text{ °C} \quad (13)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_u \quad \text{para } 16 < T_u \leq 32 \text{ °C} \quad (14)$$

Na indisponibilidade de medidas de T_u , ou de outros elementos que permitam a sua estimativa, Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997), comentam que pode ser usado T_m no lugar de T_u . Contudo, isso proporciona superestimativa de W . Isso é esperado, pois W aumenta linearmente com T_u e em condições de atmosfera não saturada, $T_m > T_u$.

Substituindo a equação 08 na 12, obtêm-se o método de Makkink modificado para estimativa de ETP:

$$ETP = 0,61 W [k_r R_a (t_x - t_n)^{0,5}] - 0,12 \quad (15)$$

Originalmente, o trabalho de Makkink considerou a escala de tempo mensal.

Os valores da ET_o obtidos pelos métodos empíricos foram comparados com as estimativas do método de PM-FAO56. Nas avaliações aplicou-se a análise de regressão linear entre o método de PM-FAO56 (X) e ET_o (Y) estimada pelos métodos empíricos apresentados e forçada a passar pela origem ($Y = \beta_1 X$). Na análise de regressão foram testadas as seguintes hipóteses pelo teste-t de Student ($\alpha = 0,01$): $H_o: \beta_1 = 1$ e $H_a: \beta_1 \neq 1$, para $Y = X$.

Além da análise de regressão, considerou-se nas avaliações dos métodos o Erro Padrão de Estimativa (EPE), o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981) e o índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

O Erro Padrão de Estimativa foi determinado pela seguinte relação:

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (16)$$

em que, O_i corresponde os valores determinados pelo método padrão Penman-Monteith FAO56; P_i os valores estimados pelos métodos empíricos testados; o índice subscrito i representa o i -ésimo valor observado; e n é o número de observações.

A concordância ou exatidão, entre valores observados e estimados é representada pelo índice d proposto por Willmott (1981), que apresenta valor adimensional, sendo o ajuste nulo ($d = 0$, nenhuma concordância) ou completo ($d = 1$, concordância perfeita), sendo este determinado como:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (17)$$

em que, P_i corresponde aos valores estimados pelos métodos testados; O_i aos valores estimados pelo método padrão PM-FAO56; O é a média dos valores estimados pelo método PM-FAO56.

O índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) é obtido pelo produto do índice de precisão (coeficiente de correlação de Pearson, r) pelo índice de concordância (d) e pode-se, com base nesse índice, classificar o desempenho dos métodos, conforme critérios sugeridos por Camargo e Sentelhas (1997) e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Classes do índice de desempenho (c), proposto por Camargo e 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
< 0,4	péssimo

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as estações, os métodos de Makkink, Hargreaves-Samani e Jensen-Haise alternaram as maiores precisões (R^2) das estimativas de ET_0 nas escalas decendial (Tabela 3) e mensal (Tabela 4). Enquanto, os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram as menores precisões das estimativas. Para uma mesma estação, os métodos de Makkink, Hargreaves-Samani e Jensen-Haise tiveram precisões similares, com diferenças entre seus R^2 menores que 4 %, sendo essas diferenças para os métodos de Thornthwaite e Camargo no máximo de 10 %.

Nas estações do Estado com clima mais seco (semiárido ou subúmido seco, com excedente hídrico nulo), Iguaba Grande (IGB), Campos dos Goytacazes (GOY) e Rio de Janeiro (RIO), foram observadas as menores precisões das estimativas nas escalas decendial e mensal. Na escala mensal, Itaperuna (ITA), clima subúmido seco, com pequeno excedente hídrico, também mostrou precisão entre as menores. Independente do método e da estação, as estimativas de ET_0 na escala mensal foram mais precisas que na decendial. As maiores precisões entre as estações foram observadas em Santa Maria Madalena - SMM (clima úmido), Paty dos Alferes - ALF (subúmido) e Maricá - MAR (subúmido seco).

Tabela 3. Coeficiente angular (β_1) e de determinação (R^2) da regressão linear simples entre as estimativas decendiais da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO56 e os métodos de Hargreaves-Samani (HS), Thornthwaite (TW), Camargo (CAM), Makkink (MAK) e Jensen-Haise (JH). Erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹), índice de concordância de Willmott (d) e de desempenho de Camargo e Sentelhas (c) para as estações do estado do Rio de Janeiro

Estação ³	Método	β_1	R^2	EPE	d	c	Estação ³	Método	β_1	R^2	EPE	d	c
ALT	HS	1,24	0,94	0,89	0,83	0,81	GOY	HS	1,08	0,87	0,52	0,94	0,87
	TW	0,90	0,78	0,61	0,91	0,80		TW	1,07	0,74	0,74	0,90	0,78
	CAM	1,00	0,82	0,49	0,94	0,86		CAM	1,09	0,76	0,71	0,90	0,79
	MAK	0,95	0,93	0,33	0,96	0,93		MAK	0,80	0,86	0,81	0,81	0,75
	JH	1,48	0,94	1,71	0,66	0,64		JH	1,34	0,88	1,34	0,76	0,71
MAR	HS	1,31	0,92	1,14	0,79	0,75	COR	HS	1,32	0,93	1,04	0,76	0,73
	TW	1,06	0,82	0,57	0,93	0,84		TW	0,99	0,79	0,45	0,94	0,83
	CAM	1,12	0,86	0,64	0,92	0,86		CAM	1,10	0,82	0,55	0,92	0,83
	MAK	0,98	0,91	0,34	0,96	0,92		MAK	1,00	0,91	0,31	0,96	0,92
	JH	1,60	0,93	2,10	0,61	0,59		JH	1,57	0,93	1,80	0,61	0,58
IGB	HS	1,01	0,88	0,43	0,97	0,91	RES	HS	1,26	0,91	0,90	0,83	0,79
	TW	0,95	0,78	0,67	0,93	0,82		TW	0,97	0,73	0,59	0,91	0,78
	CAM	0,97	0,79	0,63	0,94	0,83		CAM	1,07	0,78	0,61	0,91	0,81
	MAK	0,75	0,87	1,06	0,78	0,72		MAK	0,95	0,91	0,33	0,96	0,92
	JH	1,25	0,88	1,14	0,84	0,79		JH	1,51	0,91	1,71	0,65	0,62
ITA	HS	1,20	0,92	0,82	0,86	0,82	RIO	HS	1,06	0,87	0,43	0,95	0,89
	TW	1,08	0,77	0,71	0,91	0,79		TW	0,99	0,74	0,58	0,92	0,79
	CAM	1,12	0,81	0,71	0,91	0,82		CAM	1,06	0,82	0,56	0,93	0,85
	MAK	0,89	0,91	0,48	0,92	0,88		MAK	0,79	0,85	0,82	0,81	0,75
	JH	1,48	0,92	1,76	0,66	0,63		JH	1,29	0,88	1,15	0,79	0,74
SMM	HS	1,24	0,96	0,77	0,86	0,84	ANG	HS	1,32	0,91	1,06	0,77	0,73
	TW	0,92	0,83	0,45	0,94	0,85		TW	1,16	0,77	0,75	0,87	0,77
	CAM	1,03	0,86	0,38	0,96	0,89		CAM	1,22	0,83	0,86	0,85	0,78
	MAK	0,95	0,95	0,28	0,97	0,95		MAK	0,99	0,90	0,31	0,96	0,91
	JH	1,46	0,96	1,42	0,71	0,70		JH	1,61	0,92	1,93	0,60	0,57

³ Paty do Alferes - ALF, Márcia - MAR, Iguaba Grande - IGB, Itaperuna - ITA, Sta Maria Madelena - SMM, Campos dos Goytacazes - GOY, Cordeiro - COR, Resende - RES, Rio de Janeiro - RIO, Angra dos Reis - ANG.

Os métodos baseados originalmente na relação entre ET_o e R_s (Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink) apresentaram elevada precisão, devido a maior parte da variabilidade de ET_o ser dependente do seu termo radioativo (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). Em climas úmidos, espera-se que a correlação entre ET_o e R_s seja maior, visto que normalmente a contribuição do termo aerodinâmico e da advecção é menor nessas condições do que em climas secos (TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013). As estimativas do método de PM-FAO56, nas condições do estado do Rio de Janeiro avaliadas no presente trabalho, tiveram maior contribuição do seu termo diabático e entre 65 (IGB) e 97 % (Cordeiro - COR), com tendência de aumento dessa fração com a diminuição do déficit hídrico anual. Dessa forma,

esperam-se maiores correlações entre ET_o PM-FAO56 e ET_o determinada por Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink, principalmente nas estações de clima úmido.

Tabela 4. Coeficiente angular (β_1) e de determinação (R^2) da regressão linear simples entre as estimativas mensais da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO56 e os métodos de Hargreaves-Samani (HS), Thornthwaite (TW), Camargo (CAM), Makkink (MAK) e Jensen-Haise (JH). Erro padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹), índice de concordância de Willmott (d) e de desempenho de Camargo e Sentelhas (c)

Estação ³	Método	β_1	R^2	EPE	d	c	Estação ³	Método	β_1	R^2	EPE	d	C
ALF	HS	1,25	0,96	0,90	0,80	0,79	GOY	HS	1,09	0,91	0,46	0,94	0,90
	TW	0,91	0,88	0,51	0,92	0,87		TW	1,07	0,81	0,63	0,92	0,83
	CAM	1,00	0,90	0,42	0,95	0,90		CAM	1,10	0,84	0,63	0,92	0,84
	MAK	0,96	0,95	0,25	0,97	0,95		MAK	0,80	0,89	0,77	0,81	0,77
	JH	1,49	0,97	1,71	0,61	0,60		JH	1,34	0,91	1,31	0,74	0,71
MAR	HS	1,32	0,96	1,13	0,77	0,75	COR	HS	1,33	0,92	1,06	0,73	0,70
	TW	1,06	0,90	0,45	0,95	0,91		TW	0,99	0,87	0,34	0,96	0,89
	CAM	1,13	0,94	0,60	0,93	0,90		CAM	1,11	0,88	0,50	0,93	0,87
	MAK	1,00	0,94	0,26	0,98	0,95		MAK	1,01	0,91	0,29	0,96	0,92
	JH	1,62	0,97	2,08	0,59	0,58		JH	1,58	0,94	1,81	0,57	0,55
IGB	HS	1,02	0,93	0,33	0,98	0,94	RES	HS	1,27	0,94	0,91	0,80	0,78
	TW	0,96	0,85	0,58	0,94	0,87		TW	0,98	0,82	0,48	0,93	0,84
	CAM	0,99	0,87	0,53	0,95	0,89		CAM	1,08	0,86	0,55	0,92	0,86
	MAK	0,76	0,92	1,01	0,78	0,75		MAK	0,96	0,92	0,27	0,97	0,93
	JH	1,26	0,93	1,14	0,83	0,80		JH	1,52	0,94	1,73	0,61	0,59
ITA	HS	1,21	0,92	0,82	0,85	0,82	RIO	HS	1,06	0,91	0,37	0,96	0,92
	TW	1,08	0,83	0,61	0,92	0,84		TW	0,99	0,82	0,47	0,94	0,85
	CAM	1,13	0,87	0,66	0,92	0,85		CAM	1,07	0,90	0,50	0,94	0,90
	MAK	0,90	0,91	0,45	0,93	0,89		MAK	0,79	0,89	0,79	0,80	0,76
	JH	1,49	0,93	1,75	0,64	0,62		JH	1,30	0,92	1,13	0,78	0,75
SMM	HS	1,25	0,96	0,78	0,84	0,83	ANG	HS	1,32	0,91	1,07	0,75	0,71
	TW	0,92	0,90	0,35	0,96	0,91		TW	1,17	0,87	0,68	0,89	0,83
	CAM	1,04	0,92	0,30	0,97	0,93		CAM	1,24	0,90	0,86	0,85	0,81
	MAK	0,96	0,95	0,23	0,98	0,95		MAK	0,99	0,89	0,29	0,96	0,91
	JH	1,47	0,97	1,43	0,69	0,67		JH	1,61	0,93	1,96	0,57	0,54

³ Paty do Alferes - ALF, Márica - MAR, Iguaba Grande - IGB, Itaperuna - ITA, Sta Maria Madelena - SMM, Campos dos Goytacazes - GOY, Cordeiro - COR, Resende - RES, Rio de Janeiro - RIO, Angra dos Reis - ANG.

Apesar da temperatura do ar ser influenciada diretamente pela radiação, outros fatores, como umidade do ar (LYRA et al., 2011), velocidade do vento, nebulosidade (HARGREAVES e SAMANI, 1985), altitude (ALLEN, 1995) e advecção (TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013) também influenciam na sua variação. Esses fatores contribuem para processos não lineares entre radiação e aquecimento do ar, e dessa forma, entre ET_o e temperatura do ar. Associado a isso, a contribuição do termo adiabático no método de PM-FAO56 foi menor que do diabático, conforme discutido anteriormente. Devido a parcela de contribuição não linear desses diversos fatores e a menor contribuição do termo

aerodinâmico, espera-se menor correlação de ET_o estimada pelos métodos baseados apenas em relações lineares com a temperatura do ar, do que os métodos baseados em radiação e temperatura do ar.

Para Campos dos Goytacazes, Norte Fluminense, Mendonça et al. (2003) compararam as estimativas diárias e as médias de três dias, semanal e decendial de ET_o pelos métodos PM, parametrizado por Smith et al. (1991), Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Makkink com ET medida em lisímetro de pesagem cultivado com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé). O método de PM apresentou as maiores precisões das estimativas (R^2 entre 0,58, na escala diária e 0,82, na escala decendial), seguido de Jensen-Haise (entre 0,57, diária e 0,82, decendial), Makkink (entre 0,54, diária e 0,79, decendial) e Hargreaves-Samani (entre 0,49, diária e 0,79, decendial).

Barros et al. (2009) avaliaram o desempenho das estimativas de ET_o pelos métodos de PM-FAO56, Hargreaves-Samani, Camargo e Makkink em relação as medidas de um lisímetro de pesagem cultivado com grama batatais em Seropédica, RJ, na escala diária e médias de três e cinco dias. Os métodos de PM-FAO56 (R^2 entre 0,61, na escala diária e 0,92, na escala cinco dias) e Hargreaves-Samani (entre 0,48, diária e 0,70, cinco dias) se destacaram com as maiores precisões, sendo as menores observadas para os métodos de Makkink (entre 0,27, diária e 0,64, cinco dias) e Camargo (entre 0,29, diária e 0,68, cinco dias).

Tabari, Grismer e Trajkovic (2013), consideraram como referência o método PM-FAO56 e também observaram maiores precisões das estimativas mensais de ET_o pelos métodos de Jensen-Haise (0,94) e Hargreaves-Samani (0,95) ajustado as condições climáticas locais, em relação a precisão de Thornthwaite (0,82) nas condições de clima úmido do Norte do Irã (Rasht). Bakhtiari et al. (2011) também no Irã, contudo em condições de clima semiárido (Kerman, Sudeste do Irã), avaliaram as determinações de ET_o pelos métodos de PM-FAO56, Makkink e Hargreaves-Samani em relação a ET obtida com base em medidas lisimétricas diárias (grama - *Festuca Lolium perene*). O método Hargreaves-Samani (0,62) foi mais preciso que PM-FAO56 (0,56) e Makkink (0,44).

Pereira, Sediya e Villa Nova (2012) avaliaram as determinações de ET_o para Piracicaba, SP e Davis, CA (EUA) pelos métodos de Thornthwaite e Camargo (semanal e mensal), Hargreaves-Samani e Jensen-Haise (semanal) e Makkink (diária), tendo como referência o método PM-FAO56. As estimativas mensais de ET_o pelo método de Thornthwaite ($R^2 = 0,76$, Piracicaba) e Camargo ($R^2 = 0,85$, Piracicaba) foram mais precisas que na escala semanal. Similar ao presente trabalho, na escala semanal, os métodos de Hargreaves-Samani ($R^2 = 0,86$ em Piracicaba e $R^2 = 0,96$ em Davis) e Jensen-Haise ($R^2 = 0,91$ em Piracicaba) foram mais precisos que Thornthwaite ($R^2 = 0,49$ em Piracicaba e $R^2 = 0,91$ em Davis) e Camargo ($R^2 = 0,64$ em Piracicaba e $R^2 = 0,95$ em Davis). O método de Makkink mostrou precisão elevada na escala diária ($R^2 = 0,94$ em Piracicaba e $R^2 = 0,86$ em Davis). Não foram avaliados os métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise na escala mensal e Makkink na semanal e mensal. Os autores comentaram que se espera maior precisão desses métodos à medida que se aumenta a escala de tempo das estimativas, como observado para os métodos de Thornthwaite e Camargo.

A análise de regressão linear entre ET_o estimada pelos métodos empíricos e o método PM-FAO56 indicou tendência de superestimativa dos métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise em todas as estações e escalas de tempo. De forma geral, com base no coeficiente angular da regressão forçado a passar pela origem (β_1), as superestimativas foram entre 1,5% (IGB) e 32,4 % (ANG) para o método de Hargreaves-Samani e de 12,5 % (IGB) a 61,5 % (ANG) para Jensen-Haise. Para esses dois métodos, observou-se também que o resíduo aumentou diretamente proporcional aos valores de ET_o . Esses resultados, associados aos valores de β_1 com diferenças elevadas em relação ao ideal (1) e os elevados valores de R^2 , apresentados anteriormente, indicaram que o erro sistemático se sobressaiu em relação ao não sistemático (WILLMOTT, 1981). Esses resultados recomendam a necessidade de ajuste local dos coeficientes desses métodos.

Os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram duas tendências, superestimativa ou subestimativa, dependendo da estação. Para o método de Thornthwaite a tendência de subestimativa

prevaleceu entre as estações ALF, IGB, SMM, COR, RES e RIO, com subestimativas inferiores a 10 %, enquanto nas demais estações (ANG, GOY, MAR e ITA) as superestimativas foram menores que 17,5 %. No caso do método de Camargo, com exceção de ALF e IGB, com subestimativas, respectivamente, de 0,5 e 3,1 %, as demais estações apresentaram superestimativas entre 3 (SMM) e 24,2 % (ANG). Pereira, Sedyama e Villa Nova (2012) para Piracicaba, SP e Davis, CA obtiveram melhores estimativas desses métodos quando utilizado uma temperatura efetiva, proposta por Camargo et al. (1999). Assim, antes de propor qualquer ajuste local desses métodos é necessário avaliar a aplicação da temperatura efetiva nas condições climáticas do estado do Rio de Janeiro.

As estimativas do método de Makkink se distribuíram em torno da linha 1:1, o que resultou na maior parte das estações (MAR, ITA, SMM, COR, RES e ANG) tendência de subestimativa de ET_o para valores menores que 2,5-3,5 mm d⁻¹ (dependendo da estação) e superestimativa nos valores maiores. Nas demais estações, a tendência foi de subestimativa de ET_o . Na média, observou-se, com base no β_1 , que todas as estações apresentaram subestimativas entre 1,6 % (MAR) e 24,8 % (IGB). A exceção foi a estação de Cordeiro com superestimativa de 1,5 %. As maiores diferenças em relação as estimativas de PM-FAO56 foram observadas nas estações de clima semiárido e subúmido seco com excedente hídrico nulo.

A tendência de superestimativa dos métodos de Jensen-Haise e Hargreaves-Samanai foi observada por vários autores (MENDONÇA et al. 2003; BARROS et al., 2009; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013) em diversas condições de clima. Nesses estudos, destacou-se o método de Jensen-Haise, com superestimativas superiores à 18 %. Pereira, Sedyama e Villa Nova (2012) e Bakhtiari et al. (2011) observaram subestimativa para o método de Hargreaves-Samani de 3 e 30 %, respectivamente. O método de Jensen-Haise mostrou superestimativa de 26 % em Piracicaba (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). A tendência geral de subestimativa do método de Makkink é reportada por diversos autores (MENDONÇA et al., 2003; BAKHTIARI et al., 2011; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012; TABARI; GRISMER; TRAJKOVIC, 2013), enquanto Barros et al. (2009) observaram superestimativa de 4,5 %.

Pereira, Sedyama e Villa Nova (2012) observaram, que apesar da precisão satisfatória das estimativas dos métodos de Thornthwaite e Camargo na escala mensal (Piracicaba, SP e Davis, CA) e na semanal em Davis, CA, esses métodos subestimaram ET_o na escala semanal em Davis, CA em 67 % (Thornthwaite) e 72 % (Camargo). Em Piracicaba, SP, apesar dos autores não apresentarem os resultados numéricos dessas estatísticas, pela análise visual dos gráficos de dispersão, observaram-se estimativas de ET_o próximas e entorno da linha 1:1, padrão similar ao apresentado neste trabalho. Os autores concluem que esses métodos têm baixa exatidão das estimativas para climas semiáridos, com elevada subestimativa. Padrão de subestimativa foi também observado por Tabari, Grismer e Trajkovic (2013).

Dois padrões foram identificados para exatidão com base no coeficiente de concordância de Willmott e no Erro Padrão de Estimativa, sendo independentes das escalas de tempo. O primeiro padrão, observado nas estações de clima úmido (ANG, SMM, COR e RES), subúmido (ALF) e subúmido seco com pequeno excedente no verão (ITA e MAR), o método de Makkink apresentou acurácia superior (maior d e menor EPE) aos demais métodos. No segundo padrão, o método de Hargreaves-Samani destacou-se nas estações IGB (semiárido), GOY e RIO (subúmido seco com excedente hídrico nulo) com estimativas mais acuradas do que as apresentadas pelos outros métodos. Nos dois padrões, os métodos mais acurados se seguiram de Thornthwaite e Camargo, com exatidões entre as maiores, enquanto Jensen-Haise mostrou as menores exatidões.

As estimativas de ET_o por todos os métodos apresentaram maiores EPE relativo (EPE / ET_o média) na escala decenal em relação a mensal, ou seja, menor erro na escala mensal. Da mesma forma que o EPE relativo, o índice de Willmott indicou que as estimativas dos métodos de Thornthwaite, Camargo e Makkink na escala mensal tiveram maiores concordâncias em relação às estimativas decenais. Para o método de Jensen-Haise e Hargreavse-Samani, o resultado foi o oposto, e as estimativas

na escala decendial apresentaram maiores d em relação às estimativas mensais. Com exceção de Hargreaves-Samani, que mostrou maior concordância na escala mensal nas estações de IGB, GOY e RIO.

O padrão de diminuição do EPE com o aumento da escala de tempo das estimativas foi observado também por Mendonça et al. (2003) da escala diária para decendial e Barros et al. (2009) da escala diária para cinco dias. Mendonça et al. (2003) apresentaram EPE entre 0,49 (decendial) e 1,0 mm d⁻¹ (diária) para o método de PM e de 0,53 (decendial) à 1,11 mm d⁻¹ (diária) para Hargreaves-Samani. Os métodos analisados por Barros et al. (2009) mostraram EPE entre 0,37 (cinco dias) e 0,62 mm d⁻¹ (diário) para PM-FAO e de 1,17 (cinco dias) a 1,60 mm d⁻¹ (diária) para Hargreaves-Samani. Barros et al. (2009) também identificaram tendência de aumento da exatidão (d) com o aumento da escala de tempo das estimativas para todos os métodos (0,74, diária a 0,89, decendial para Camargo e 0,86, diária à 0,97, decendial para PM-FAO56).

Tabari, Grismer e Trajkovic (2013) observaram resultados similares ao do presente trabalho, com os métodos de Hargreaves-Samani (0,34 mm d⁻¹) e Thornthwaite (0,64 mm d⁻¹) com os menores erros, enquanto Jensen-Haise, apesar da elevada precisão, mostrou erro entre os maiores (1,18 mm d⁻¹). Bakhtiari et al. (2001), em clima semiárido também tiveram maiores acurácias na escala diária para os métodos de PM-FAO56 (EPE = 2,28 mm d⁻¹ e d = 0,63) e Hargreaves-Samani (EPE = 2,48 mm d⁻¹ e d = 0,60), enquanto Makkink (EPE = 3,87 mm d⁻¹ e d = 0,26) apresentou as menores acurácias. Esse resultado é similar ao das estações de clima semiárido e subúmido seco com excedente hídrico nulo do presente trabalho, onde Hargreaves-Samani proporcionou os menores EPE.

Quando avaliado o desempenho dos métodos (índice de Camargo e Sentelhas), observaram-se também dois padrões, iguais aos apresentados pela exatidão. Na maior parte das estações (ALF, ITA, SMM, COR, RES, MAR e ANG), os melhores desempenhos, nas duas escalas de tempo avaliadas foram obtidos pelo método de Makkink, seguidos dos métodos de Thornthwaite e Camargo. No segundo padrão, Hargreaves-Samani mostrou desempenho superior aos demais métodos nas estações IGB, GOY e RIO. Análogo ao primeiro padrão, os métodos de Camargo e Thornthwaite apresentaram desempenho entre os melhores. Para todas as estações, o método de Jensen-Haise mostrou os piores desempenhos. Independente do padrão, os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram diferenças entre o índice c inferiores a 6 %, o que indicou que esses métodos apresentaram desempenhos similares, o que não foi observado para os métodos de Hargreaves-Samani, Makkink e Jensen-Haise.

Os desempenhos dos métodos de Thornthwaite, Camargo e Makkink na escala mensal foram melhores do que na escala decendial. Para os métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise esse resultado foi observado apenas para as estações de GOY, RIO e IGB.

Os desempenhos decendial e mensal do método de Hargreaves-Samani variou entre bom (MAR, COR e ANG) e ótimo (conforme Tabela 2), com predominância de muito bom (ALF, ITA, SMM e RES), enquanto o desempenho de Makkink foi bom (IGB, GOY e RIO) ou ótimo, com maior frequência da última classe. Os métodos de Thornthwaite e Camargo tiveram desempenhos muito bom e ótimo, com maior ocorrência de muito bom na escala decendial e de ótimo na escala mensal. Independente da escala de tempo, o desempenho do método de Jensen-Haise foi entre sofrível (COR e ANG) e muito bom (IGB), com maior frequência de desempenho mediano (ALF, MAR, ITA e RES).

Barros et al. (1999) observaram desempenho de mediano (diário) a ótimo (cinco dias) para o método de PM, de mediano (diário) a muito bom (cinco dias) para Hargreaves-Samani e entre péssimo (diário) e bom (cinco dias) para Camargo e Makkink.

O desempenho similar dos métodos de Thornthwaite e Camargo no presente trabalho deve-se ao fato de Camargo ser uma simplificação de Thornthwaite para as escalas decendial e mensal (CAMARGO e CAMARGO, 1983; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). O método de Camargo foi calibrado com base no fator F e introduziu R_a para reproduzir as estimativas de ET_o obtidas por Thornthwaite para as condições climáticas de São Paulo (CAMARGO, 1971; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). Os desempenhos entre muito bom e ótimo desses métodos para o estado do Rio

de Janeiro estão relacionados, em parte a: i) Thornthwaite considerar o ajuste dos seus coeficientes a e I as condições climáticas térmicas locais e sazonais e, ii) Camargo ter sido calibrado com base no método de Thornthwaite para as condições climáticas de São Paulo, que são semelhantes às da maior parte das regiões fisiográficas do Rio de Janeiro e, o seu fator F ser corrigido pela temperatura do ar.

O desempenho, com base no índice c de Camargo e Sentelhas, sofrível e mediano do método de Jensen-Haise e bom de Makkink e de Hargreaves-Samani em algumas estações foi decorrente principalmente das menores exatidões das estimativas desses métodos, visto que a precisão deles foi elevada em todas as estações. Esses resultados indicam que a maior parte dos erros desses métodos nas estações com desempenhos abaixo de bom foram devidos a erros sistemáticos (WILLMOTT, 1981). Assim é necessário o ajuste local desses métodos para que possam ser usados sem restrição em todo o estado do Rio de Janeiro, principalmente o método de Jensen-Haise.

O método de Makkink apresentou desempenho ótimo na maior parte das estações, com exceção das estações caracterizadas como climas mais secos do estado do Rio de Janeiro. O desempenho ótimo, em parte, é devido ao método de Makkink considerar o fator de ponderação psicrométrico W , que representa a eficiência de conversão para cada fonte de energia (radiação e calor sensível) em calor latente (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). No presente caso, W foi obtido pela temperatura do ar média, ou seja, considerou a partição entre as energias do termo radioativo e aerodinâmico em função das condições térmicas médias. A consideração de T_m ao invés de T_u na determinação de W , contudo, resultou nas estimativas com menor desempenho nas estações mais secas do Estado. Isso, porque W aumenta linearmente com T_u e em condições de atmosfera não saturada, $T_m > T_u$, com tendência de aumentar essas diferenças em climas mais secos.

Os melhores desempenhos dos métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise nas estações de clima semiárido ou subúmido seco sem excedente hídrico são devidos aos seus coeficientes serem ajustados para as condições climáticas de Davis, CA, e os mesmos não considerarem na sua formulação nenhum ajuste climático local, a exemplo, de Thornthwaite e Makkink, ou a ponderação da contribuição do termo radiativo e aerodinâmico, a exemplo do uso do fator de ponderação W no método de Makkink.

6 CONCLUSÕES

Os métodos de Jensen-Haise e Makkink, com as modificações propostas no presente trabalho, baseados apenas nos extremos de temperatura do ar e radiação solar extraterrestre, assim como, o método de Hargreaves-Samani mostram precisão elevada das estimativas. Contudo, precisam ser ajustados às condições climáticas do estado do Rio de Janeiro para melhorar a exatidão das suas estimativas, principalmente o método de Jensen-Haise.

Com os coeficientes originais, o método de Makkink modificado pode ser usado para estimativa decenal ou mensal da evapotranspiração de referência nas regiões do estado do Rio de Janeiro com clima úmido, subúmido e subúmido seco com pequeno excedente hídrico, característicos das estações localizadas principalmente no interior do Estado. Nas regiões de baixadas litorâneas do Estado, com clima semiárido ou subúmido seco com excesso hídrico nulo, o método de Hargreaves-Samani pode ser usado. O método de Jensen-Haise modificado não apresenta estimativas acuradas e, assim, não se aconselha o seu uso com os coeficientes originais para o estado do Rio de Janeiro.

Os métodos de Camargo e Thornthwaite, baseados apenas na temperatura do ar, apresentam estimativas decenciais e mensais precisas e exatas em todas as regiões do Estado e podem ser usados para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Rio de Janeiro, particularmente na escala mensal.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por disponibilizar as séries dos elementos meteorológicos das suas estações convencionais no estado do Rio de Janeiro.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. Self-calibration method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrologic Engineering**, Purdue, n. 2, v. 2, p. 56-67, 1997.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARAÚJO, F.F.S.; SILVA, G.M.; BATISTA, E.L.S.; OLIVEIRA-JUNIOR, J.F.; LYRA, G.B. Espacialização da temperatura do ar mensal no estado do Rio de Janeiro baseada em modelos lineares e dados SRTM. In: IX SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 9., 2010, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sengef, 2010.

BAKHTIARI, B., GHAHREMAN, N.; LIAGHAT, A. M.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of Reference Evapotranspiration Models for a Semiarid Environment Using Lysimeter Measurements. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Teerã, v. 13, p. 223-237, 2011.

BARROS, V. R.; DE SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; da SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** (Agrária), Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

CAMARGO, A.P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Boletim Técnico 116, 3ª. ed., Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1971, 24p.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Teste de uma equação simples da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 3., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1983. p. 229-244.

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**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, A.P.; MARIN F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

GOIS, G.; SOUZA, J. L.; SILVA, P. R. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F. Caracterização da desertificação no estado de Alagoas utilizando variáveis climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 301-314, 2005.

HARGREAVES G.H.; SAMANI Z.A. Estimation of potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, Delaware, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 108, p. 223-230, 1982.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HARGREAVES, G.H. Defining and Using Reference Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v.120, n.6, p.1132-1139, 1994.

JENSEN M.E.; HAISE H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, Delaware, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v.89, p.15-41, 1963.

LYRA, G.B.; LYRA, G.B.; PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; LYRA, G. B.; SANTIAGO, A.V.; FOLEGATTI, M.V. Média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar e sua influência na evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (FAO 56) em Piracicaba - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n.2, p. 328-337, 2004.

LYRA, G.B.; SEDIYAMA, G.C.; LYRA, G.B.; PEREIRA, A. R.; SOUZA, E. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura "único" padrão boletim FAO-56. **STAB**, Piracicaba, v. 25, p. 40-43, 2007.

LYRA, G. B.; LYRA, G.B.; SOUZA, J.L.; SANTOS, M.A. Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 28, p. 22-25, 2010.

LYRA, G.B.; SANTOS, M.J.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; SANTOS, M.A. Espacialização da temperatura do ar anual para o estado de Alagoas com diferentes modelos digitais de elevação e resoluções espaciais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, p. 275-287, 2011.

MAKKINK, G.F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, London, v.11, p.277-288, 1957.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.D.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

PALMER, W.C. **Meteorological Drought**. Washington: Department of Commerce Weather Bureau; 1965. 58 p. (Research Paper, 45).

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: Fealq, 1997. 183 p.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; VILLA NOVA, N.A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2012. 323 p.

SANTOS, A.A.R. **Evapotranspiração de referência estimada por métodos de dados climáticos mínimos no estado do Rio de Janeiro**. 41 f. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

TABARI, H.; GRISMER, M.E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 31, n. 2, p. 107-117, 2013.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, New York, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, p.104. 1955.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, California, v.2, n.2, p.184-194, 1981.

WMO – World Meteorological Organization. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Preliminary seventh edition, WMO n.8, Prepared by World Meteorological Organization, Geneva, 2006.