



Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil

Fernando Mendes Sanches¹, Arthur Ribeiro Ximenes¹, Paulo Carteri Coradi², Cassiano Garcia Roque¹ & Fernando França da Cunha³

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, MS.

²Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS.

³Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. E-mail: fernando.cunha@ufv.br (Autor correspondente).

Palavras-chave:

calibração de equações
ET₀
Penman-Monteith
Priestley & Taylor.

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho, avaliar o desempenho e calibrar métodos contidos no software Sevap para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) para a região Norte do Brasil. As metodologias testadas foram Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor e Thornthwaite. Os dados meteorológicos necessários para execução desse trabalho foram retirados das Normais Climatológicas (1961-1990) de 47 localidades da região Norte do Brasil, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). O método tomado como padrão foi o Penman-Monteith-FAO 56 e realizaram-se análises de regressão entre os valores obtidos com as metodologias testadas e valores estimados pelo software Sevap. A calibração das equações foi realizada por meio dos coeficientes “a” e “b” das respectivas regressões lineares simples. A comparação dos resultados foi por meio do coeficiente de determinação (r²), dos coeficientes “a” e “b” das equações de regressão linear, erro-padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r) e do coeficiente de confiança (c). Foram analisadas as correlações simples entre os valores de ET₀ obtidas pelos diferentes métodos e os elementos climáticos medidos. Verificou-se que a ET₀ obtida por Penman-Monteith-FAO 56, Jensen-Haise e Makkink apresentaram correlação positiva com a insolação. Os métodos de Hargreaves-Samani e Priestley & Taylor não apresentaram correlação com nenhum elemento climático. Os métodos de Linacre e Thornthwaite apresentaram correlação positiva com as temperaturas média e máxima do ar. Após a calibração das equações estudadas, as estimativas pelos diferentes métodos foram mais próximas aos valores de ET₀ por Penman-Monteith. O método de Priestley & Taylor apresentou melhor desempenho em relação aos demais métodos e pode ser utilizado para estimativa confiável da ET₀ na região norte do Brasil. Após serem calibradas, as metodologias de Makkink e Jensen-Haise podem ser utilizadas para estimativa da ET₀ na região norte do Brasil.

Key words:

calibration equations
ET₀
Penman-Monteith
Priestley & Taylor

Estimate of evapotranspiration of reference on the northern Brazil

ABSTRACT

The aimed of this study was to evaluate the performance and the calibration methods contained in Sevap software for estimating reference evapotranspiration (ET₀) for the Northern region of Brazil. The methodologies tested were Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor and Thornthwaite. The meteorological data needed to perform this work were taken from normal climatic (1961-1990) of 47 localities in northern Brazil, provided by the National Institute of Meteorology. The method taken as the standard was the Penman-Monteith FAO-56 and were realized regression analysis between the values obtained with the tested methodologies and values estimated by Sevap software. The calibration equations were performed by using coefficients "a" and "b" of the respective simple linear regression. The comparison of the results was by the coefficient of determination (r²), the coefficients "a" and "b" of the linear regression equations, standard error of estimate (SEE), concordance index of Willmott (d), the Pearson correlation coefficient (r) and confidence coefficient (c). Were analyzed the simple correlations between the values of ET₀ obtained by the different methods and the measured climatic elements. It was found that the ET₀ obtained by Penman-Monteith FAO-56, Jensen-Haise and Makkink were positively correlated with solar radiation. The Hargreaves-Samani and Priestley and Taylor were not showed correlated with any climatic element. The Linacre and Thornthwaite methods were positively correlated with the average and maximum air temperatures. After the calibration of the studied equations, the estimates of different methods were closer to ET₀ values by Penman-Monteith. The method of Priestley & Taylor showed better performance than the other methods and can be used for reliable estimation of ET₀ in northern Brazil. After being calibrated, the methodologies of Makkink and Jensen-Haise can be used in the estimation of ET₀ on the Northern region of Brazil.

Introdução

A evapotranspiração é o fenômeno que ocorre a partir da combinação de dois processos: (1) evaporação, que é o processo físico de transformação da água de sua fase líquida para a gasosa e ocorre tanto em massa contínua (rio, lago e represa) como em superfície úmida (planta e solo) e, (2) transpiração, que é a evaporação da água utilizada nos diversos processos metabólicos necessário ao crescimento e desenvolvimento dos vegetais (Alencar et al., 2011).

A evapotranspiração é controlada pelo balanço de energia, o qual depende da demanda atmosférica, do suprimento de água do solo às plantas e das características fisiológicas das plantas. Segundo Bernardo et al. (2008) existem vários métodos para determinar a evapotranspiração, os quais, em sua maioria, estimam a evapotranspiração potencial, ou seja, a que ocorre quando não há deficiência de água no solo que limite seu uso pelas plantas. Mas, como é de se esperar, em razão das características intrínsecas de cada cultura, a evapotranspiração potencial varia de cultura para cultura. Assim sendo, verificou-se a necessidade de definir a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ET_0) e a evapotranspiração potencial (ET_{PC}) e a real (ET_C) por cultura. Elas podem ser assim definidas: (A) ET_0 - evapotranspiração que ocorre pela cultura hipotética, a qual possui uma altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor de água igual a 70 s m^{-1} . Desta forma, esse conceito assemelha-se com a evapotranspiração de um extenso gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem limitação de água (Allen et al., 1998); (B) ET_{PC} - evapotranspiração de determinada cultura quando há ótimas condições de umidade e nutriente no solo, de modo a permitir a produção potencial desta cultura no campo (Bernardo et al., 2008); (C) ET_C - quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura, sob as condições normais de cultivo, isto é, sem a obrigatoriedade do teor de umidade permanecer sempre próximo à capacidade de campo, o que leva a concluir que a ET_C é menor

ou, no máximo, igual à ET_{PC} ($ET_C \leq ET_{PC}$) (Bernardo et al., 2008).

Para alcançar adequadas estimativas de ET_{PC} e ET_C faz-se necessário a obtenção de estimativas confiáveis de ET_0 , principalmente para o profissional de agricultura irrigada. Além disso, estímulos confiáveis de ET_0 são necessárias para enfrentar outros aspectos relacionados ao gerenciamento dos recursos hídricos e ambientais, como o abastecimento público e a preservação ambiental dos cursos d'água. O desenvolvimento e aplicação de técnicas para estimar a ET_0 são aspectos importantes da pesquisa hidrológica (Bidlake, 2002). Segundo Liang et al. (2009), a evapotranspiração é a principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, e está estreitamente relacionado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e ao escoamento superficial. Além disso, a otimização e conservação do recurso hídrico são cada vez mais importantes, principalmente pela sobre-exploração a que ele é submetido (Jensen et al., 1997; Sanij et al., 2004).

A ET_0 pode ser determinada por diferentes maneiras (Cunha et al., 2013). Dentre os métodos diretos para determinar a ET_0 , o mais preciso é o lisímetro de pesagem, sendo de custo elevado e restrito às instituições de pesquisas. Nos métodos indiretos estão enquadrados os evaporímetros, como o tanque Classe A e o atmômetro modificado. O método baseado em tanques de evaporação, como o Classe A, mede o efeito integrado da radiação, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa sobre a evaporação de uma superfície de água-livre. Outros métodos indiretos são aqueles que estimam a ET_0 por meio dos elementos meteorológicos, como os modelos empíricos de Penman, Jensen-Haise, Priestley & Taylor, Hargreaves-Samani, Linacre, Makkink e de Thornthwaite. De acordo com Carvalho et al. (2011), muitos destes métodos possuem variantes, por questões de ajustes e calibrações locais, elevando ainda mais, a quantidade de métodos disponíveis.

O método de Penman-Monteith-FAO 56 (Allen et al., 1998) é bastante preciso, e por isso é utilizado como padrão em comparações com outros métodos.

De acordo com Allen et al. (1998), esse modelo apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ET_0 porque associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração. Doorenbos & Pruitt (1977) modificaram a equação de Penman (1963), dando maior sensibilidade em função do vento, ajustando-se o fator de correção da FAO, com base nas condições climáticas locais e assumindo-se densidade do fluxo de calor no solo igual a zero, em períodos diários. Segundo Cavalcante Jr. et al. (2011), apesar do método de Penman-Monteith-FAO 56 estimar a ET_0 de forma satisfatória, muitas vezes nem todos os elementos meteorológicos necessários para o uso desse modelo encontram-se disponíveis. Nessa situação, outros métodos que necessitem de um número menor de elementos meteorológicos podem ser usados.

Devido à complexidade de muitas equações para estimativa da ET_0 e a urgência de implementação de novas estratégias de busca de informação pelo profissional da área de recursos hídricos e ambiental, há demanda do uso de modelos em linguagem computacional simples e acessível aos potenciais usuários. A automação é uma ferramenta que contribui, sobremaneira, na tomada de decisão da programação do uso dos recursos hídricos, em tempo quase que real estimulando, assim, o uso de microcomputadores e softwares no dimensionamento de projetos hidroagrícolas e ambientais que necessitem do conhecimento da evapotranspiração (Silva et al., 2005).

Diante dessa necessidade, foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande o programa computacional Sevap (Sistema de Estimativa da Evapotranspiração). Segundo Silva et al. (2005) esse software foi desenvolvido em linguagem computacional Delphi e em ambiente Windows. Ele pode ser instalado e operado em microcomputadores com no mínimo 150 MHz e 32 MB RAM, em ambientes Windows 95, ou superior, e Windows NT.

Diante disso, objetivou-se com este trabalho, avaliar o desempenho e calibrar métodos contidos no

software Sevap para estimativa da ET_0 para a região Norte do Brasil.

Material e Métodos

Os dados meteorológicos necessários para execução desse trabalho foram retirados das Normais Climatológicas (1961-1990) de 47 localidades da região Norte do Brasil, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010). Os códigos das estações meteorológicas e as informações de latitude, longitude e altitude estão apresentados na Tabela 1.

Foram testados os seguintes métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0): Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor e Thornthwaite. O software utilizado para determinação da ET_0 por essas metodologia supracitadas foi o Sevap (Silva et al., 2005). Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros de entrada para os seis modelos testados e para o método de Penman-Monteith-FAO 56 (Allen et al., 1998), que foi tomado como padrão para estimativa da ET_0 , seguindo recomendações da FAO.

A ET_0 obtida pelo método proposto por Penman-Monteith-FAO 56 (Allen et al., 1998), foi calculada de acordo com as equações seguintes, e depois multiplicado pelo número de dias do mês referente ao dado, resultando na unidade “mm mês⁻¹”.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} U_2 \frac{(e_s - e)}{10}}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

$$R_N = R_{ns} + R_{nl} \quad (2)$$

$$R_{ns} = R_s (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$R_{nl} = 4,8989 \cdot 10^{-9} T^4 (0,09 \sqrt{0,75 e - 0,56}) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

$$R_a = 37,6 d_r \left[\frac{\pi}{180} w_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin w_s \right] \quad (6)$$

$$a = 0,29 \cos \varphi \quad (7)$$

$$b = 0,52 \quad (8)$$

$$N = \frac{2 w_s}{15} \quad (9)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 j}{365} \right) \quad (10)$$

$$w_s = \arccos [-\operatorname{tag} \varphi \operatorname{tag} \delta] \quad (11)$$

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (12)$$

$$e = \frac{RH}{100} e_s \quad (13)$$

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 t}{237,3+t} \right)} \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{409,8 e_s}{(237,3 + t)^2} \quad (15)$$

$$G = 0,05 R_N \quad (16)$$

$$\gamma = 162,86 \frac{P}{\lambda} \quad (17)$$

$$\lambda = 2,5 \cdot 10^6 - 2.370 t \quad (18)$$

$$U_2 = \frac{4,868}{\ln(67,75 z - 5,42)} U_z \quad (19)$$

em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith-FAO 56, mm d^{-1} ; Δ a declividade da curva de pressão de saturação, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; R_N é o saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; γ a constante psicrométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; t a temperatura média do ar obtida a 2 m de altura, $^\circ\text{C}$; U_2 a velocidade do vento obtida a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_s a pressão de saturação de vapor d'água, hPa; e a pressão atual de vapor d'água, hPa; R_{ns} a radiação líquida de ondas curtas, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; R_{nl} a radiação líquida de ondas longas, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; R_s a radiação solar terrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; α o albedo ou coeficiente de reflexão da superfície, adm.; T a temperatura média do ar, K [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$]; n a duração do brilho solar, h; N o fotoperíodo, h; R_a a radiação extraterrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; a e b os coeficientes regionais, adm.; d_r a correção da distância entre Sol e Terra, adm.; w_s o ângulo

horário do nascer do sol, graus; φ a latitude, graus; δ a declinação solar, graus; j o número do dia do ano, variando de 1 a 365; RH a umidade relativa do ar, %; G o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; P a pressão atmosférica, hPa; λ o calor latente de evaporação, J kg^{-1} ; U_z a velocidade do vento medida na altura "Z", m s^{-1} ; e Z a altitude do local, m.

De posse dos valores de ET_0 , foi realizada uma análise de regressão que correlacionou os valores de ET_0 estimados pelo software Sevap com o método Penman-Monteith-FAO 56 (Allen et al., 1998) calculado com auxílio de planilha eletrônica alimentada com as Equações 1 a 19. A calibração das equações foi realizada por meio dos coeficientes "a" e "b" das respectivas regressões lineares simples.

Para comparação dos métodos de estimativa da ET_0 pelas equações originais e calibradas, foram correlacionados os valores de ET_0 estimados pelas equações empíricas originais com o método Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Foram considerados os coeficientes "a" e "b" das respectivas regressões lineares simples e o coeficiente de determinação (r^2). A melhor alternativa foi aquela que apresentou coeficiente de regressão "a" próximo de zero, coeficiente "b" próximo da unidade e maior coeficiente de determinação.

A análise de desempenho dos modelos foi feita comparando os valores de ET_0 obtidos pelos métodos empíricos com o método de Penman-Monteith-FAO 56. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi proposta por Allen et al. (1989), e se fundamenta no erro-padrão da estimativa (EPE), calculada pela equação 20. O melhor método para estimativa da ET_0 foi aquele que apresentou o menor EPE.

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (20)$$

em que: EPE é o erro-padrão de estimativa, mm mês^{-1} ; X_i a ET_0 estimada pelo método PM-FAO56,

mm mês⁻¹; Y_i a ET_0 estimadas pelos métodos testados, mm mês⁻¹; e n o número de observações.

Tabela 1. Informações das estações meteorológicas da região Norte utilizadas para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0).

Estado	Localidade	Código	Latitude (graus: minutos)	Longitude (graus: minutos)	Altitude (metros)
AC	Cruzeiro do Sul	82704	07°38'S	72°40'W	170
AC	Rio Branco	82915	09°58'S	67°48'W	160
AC	Tarauacá	82807	08°10'S	70°46'W	190
AM	Barcelos	82113	00°58'S	62°55'W	40
AM	Benjamin Constant	82410	04°23'S	70°02'W	65
AM	Carauari	82418	04°57'S	66°54'W	66
AM	Coari	82425	04°05'S	63°08'W	46
AM	Fonte Boa	82212	02°32'S	66°10'W	56
AM	Iauaretê	82067	00°37'N	69°12'W	104
AM	Itacoatiara	82336	03°08'S	58°26'W	40
AM	Lábrea	82723	07°15'S	64°50'W	61
AM	Manaus	82331	03°07'S	59°57'W	67
AM	Manicoré	82533	05°49'S	61°18'W	50
AM	Paricachoeira	82100	00°10'N	69°56'W	115
AM	Parintins	82240	02°38'S	56°44'W	29
AM	Rio Içana	82105	01°02'N	67°32'W	90
AM	Santa I. do Rio Negro	82108	00°25'S	65°02'W	45
AM	São G. da Cachoeira	82106	00°07'S	67°00'W	90
AM	Taracuá	82103	00°04'N	68°14'W	86
AM	Tefé	82317	03°50'S	64°42'W	47
AP	Cupixi	82093	00°37'N	51°47'W	71
AP	Macapá	82098	00°03'S	51°07'W	14
AP	Porto Platon	82095	00°42'N	51°27'W	84
PA	Altamira	82353	03°13'S	52°13'W	74
PA	Alto Tapajós	82741	07°21'S	57°31'W	140
PA	Belém	82191	01°26'S	48°26'W	10
PA	Belterra	82246	02°38'S	54°57'W	176
PA	Breves	82188	01°41'S	50°29'W	15
PA	Cametá	82263	02°15'S	49°30'W	24
PA	Conceição do Araguaia	82861	08°16'S	49°16'W	157
PA	Itaituba	82445	04°17'S	56°00'W	45
PA	Marabá	82562	05°22'S	49°08'W	95
PA	Monte Alegre	82181	02°00'S	54°05'W	146
PA	Óbidos	82178	01°55'S	55°31'W	37
PA	Porto de Moz	82184	01°44'S	52°14'W	16
PA	Santarém	82243	02°25'S	54°20'W	20
PA	São Félix do Xingu	82668	06°38'S	51°58'W	206
PA	Soure	82141	00°44'S	48°31'W	10
PA	Tracuateua	82145	01°04'S	46°54'W	36
PA	Tucuruí	82361	03°46'S	49°40'W	40
RO	Porto Velho	82825	08°46'S	63°55'W	95
RR	Boa Vista	82024	02°49'N	60°39'W	90
RR	Caracaraí	82042	01°50'N	61°08'W	94
TO	Palmas	83033	10°11'S	48°18'W	280
TO	Paranã	83231	12°33'S	47°50'W	275
TO	Pedro Afonso	82863	08°58'S	48°11'W	187
TO	Peixe	83228	12°01'S	48°21'W	242

Tabela 2. Parâmetros de entrada para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) pelos diferentes métodos utilizados.

Método	Parâmetros de entrada medidos					
	$T_{\text{máx}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{mín}}(^{\circ}\text{C})$	n(horas)	UR(%)	$U_2(\text{m s}^{-1})$	$P_{\text{atm}}(\text{hPa})$
Penman-Monteith	x	x	x	x	x	x
Hargreaves-Samani	x	x				
Jensen-Haise	x	x	x			
Linacre	x	x		x		
Makkink	x	x	x			
Priestley & Taylor	x	x	x			
Thornthwaite	x	x				

$T_{\text{máx}}$ - temperatura máxima; $T_{\text{mín}}$ - temperatura mínima; n - duração brilho solar; UR - umidade relativa; U_2 - velocidade do vento; e P_{atm} - pressão atmosférica.

A aproximação dos valores de ET_0 estimados por determinado método estudado, em relação aos valores obtidos com uso do método padrão, foi obtida por um índice designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Willmott et al., 1985), onde seus valores variam desde zero, onde não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice de concordância (d) foi calculado aplicando-se a equação 21. Para validação do modelo, obteve-se também o coeficiente de correlação de Pearson (r) pela equação 22 e o coeficiente de confiança ou desempenho (c) pela equação 23.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X}) + (Y_i - \bar{Y})]^2} \quad (21)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (22)$$

$$c = r d \quad (23)$$

em que: d é o índice de concordância ou ajuste de Willmott; X_i a ET_0 estimada pelo método PM-FAO56, mm mês^{-1} ; Y_i a ET_0 estimada pelos métodos testados, mm mês^{-1} ; \bar{X} a média dos valores de ET_0 estimados pelo método PM-FAO56, mm mês^{-1} ; \bar{Y} a

média dos valores de ET_0 estimados pelos métodos testados, mm mês^{-1} ; n a número de observações; r o coeficiente de correlação de Pearson; c o coeficiente de confiança ou desempenho.

Segundo Cohen (1988), o coeficiente de correlação (r) pode ser classificado como: “muito baixo” ($r < 0,1$); “baixo” ($0,1 < r < 0,3$); “moderado” ($0,3 < r < 0,5$); “alto” ($0,5 < r < 0,7$); “muito alto” ($0,7 < r < 0,9$); e “quase perfeito” ($r > 0,9$).

O coeficiente c, proposto por Camargo & Sentelhas (1997), é interpretado de acordo com os referidos autores como: “ótimo” ($c > 0,85$); “muito bom” ($0,76 < c < 0,85$); “bom” ($0,66 < c < 0,75$); “mediano” ($0,61 < c < 0,65$), “sofrível” ($0,51 < c < 0,60$), “mau” ($0,41 < c < 0,50$) e “péssimo” ($c < 0,40$).

Foram realizadas correlações simples entre os valores de ET_0 obtidas pelos diferentes métodos com os elementos climáticos medidos. Para isso, utilizou-se o programa estatístico “Assistat 7.6” (Silva, 2011).

Resultados e Discussão

Os métodos originais de Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink e Priestley & Taylor superestimaram os valores de ET_0 (Figuras 1 e 2), corroborando com os resultados de Magalhães & Cunha (2012) avaliando esses métodos no Estado de Mato Grosso do Sul. Os métodos originais de Linacre (Figura 1) e Thornthwaite (Figura 2) subestimaram os valores de

ET_0 apenas quando o método de Penman-Monteith-FAO 56 acusou estimativas superiores a 150 e 125 $mm\ mês^{-1}$, respectivamente.

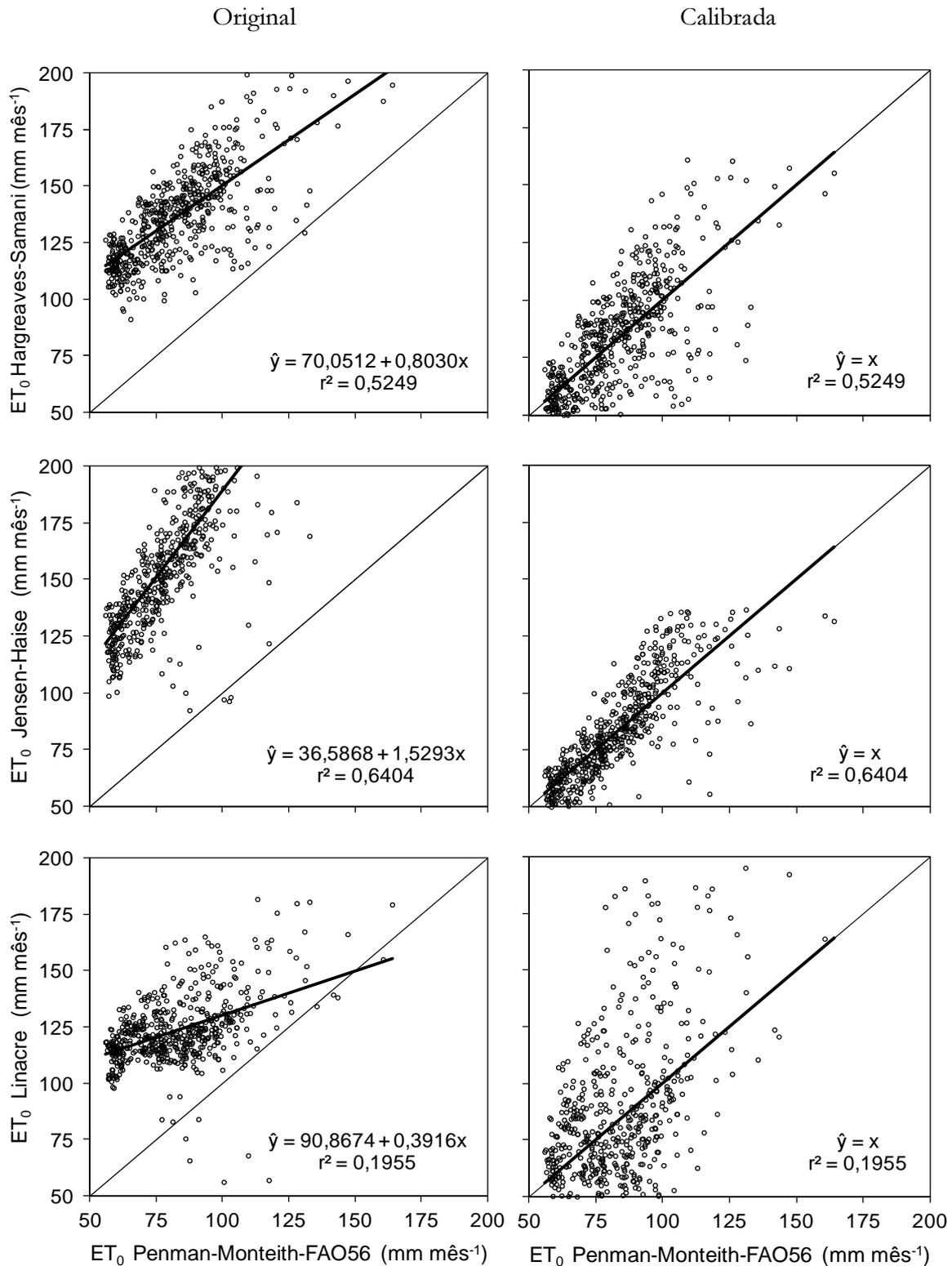


Figura 1. Valores de evapotranspiração de referência (ET_0) obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 comparados com valores de ET_0 obtidos pelos métodos originais e calibrados de Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Linacre.

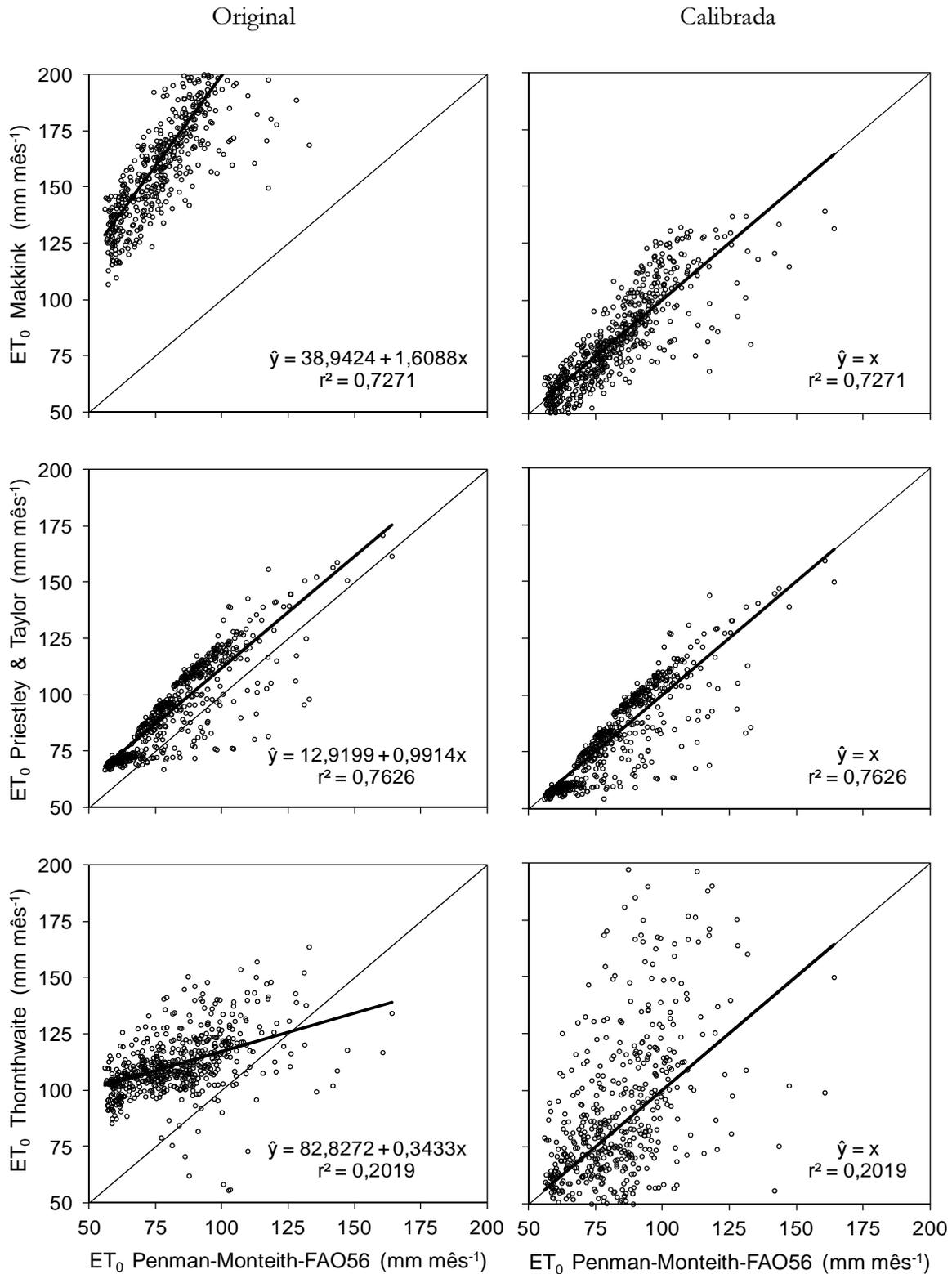


Figura 2. Valores de evapotranspiração de referência (ET₀) obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 comparados com valores de ET₀ obtidos pelos métodos originais e calibrados de Makkink, Priestley & Taylor e Thornthwaite.

As metodologias originais de Priestley & Taylor e Makkink se destacaram por apresentar os maiores coeficientes de determinação, e a metodologia de Linacre apresentou o pior ajuste. Mendonça & Dantas (2010) na Paraíba, e Pereira et al. (2009) em Minas Gerais, também observaram dentre os métodos testados para determinação da ET_0 , que Linacre obteve o pior ajuste. O método de Linacre não utiliza nenhum dado de velocidade de vento ou radiação.

De posse dos modelos originais (Figuras 1 e 2), procederam-se as calibrações das diferentes metodologias (Tabela 3). Depois de calculados os valores de ET_0 pelos modelos calibrados, aplicou-se regressão linear novamente (Figuras 1 e 2). Os modelos gerados tiveram comportamento 1:1, ou seja, os coeficientes de reta “a” e “b” apresentaram valores iguais a zero e a unidade, respectivamente. Os coeficientes de correlação de Pearson, como esperado, não sofreram alterações.

Tabela 3. Metodologias e suas respectivas equações originais e calibradas para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)

Metodologia	Modelo	Equação
Hargreaves-Samani	Original	$ET_0 = 0,0023 R_{0 \text{ mm/dia}} (t_{\max} - t_{\min})^{0,5} (t + 17,8)$
	Calibrado	$ET_0 = 0,0030 R_{0 \text{ mm/dia}} (t_{\max} - t_{\min})^{0,5} (t + 17,8) - 3,1545$
Jensen-Haise	Original	$ET_0 = R_{G \text{ mm/dia}} (0,025 t + 0,08)$
	Calibrado	$ET_0 = R_{G \text{ mm/dia}} (0,0167 t + 0,0534) - 0,8601$
Linacre	Original	$ET_0 = \left[\frac{700 (t + 0,006z)}{100 - \phi} + 15 (t - t_d) \right] / (80 - t)$
	Calibrado	$ET_0 = \left\{ \left[\frac{700 (t + 0,006z)}{100 - \phi} + 15 (t - t_d) \right] / [0,3586(80 - t)] \right\} - 8,5791$
Makkink	Original	$ET_0 = R_{G \text{ mm/dia}} \left(\frac{s}{s + \gamma} \right) + 0,12$
	Calibrado	$ET_0 = 0,6351 R_{G \text{ mm/dia}} \left(\frac{s}{s + \gamma} \right) - 0,7942$
Priestley & Taylor	Original	$ET_0 = 1,26 W (R_N - G)$
	Calibrado	$ET_0 = 1,2875 W (R_N - G) - 0,4687$
Thornthwaite	Original	$ET_0 = \frac{16}{30} \left(10 \frac{t_i}{I} \right)^a \frac{N}{12}$
	Calibrado	$ET_0 = 0,1426 \left(10 \frac{t_i}{I} \right)^a N - 9,0072$

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); $R_{0 \text{ mm/dia}}$ - radiação extraterrestre (mm dia⁻¹); t_{\max} - temperatura máxima (°C); t_{\min} - temperatura mínima (°C); t - temperatura média (°C); $R_{G \text{ mm/dia}}$ - radiação global (mm dia⁻¹); z - altitude do local (m); ϕ - latitude do local (graus); t_d - temperatura do ponto de orvalho (°C); s - declividade da curva de pressão (kPa °C⁻¹); γ - constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); W - fator de ponderação em função da temperatura (°C); R_N - saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G - fluxo de calor (MJ m⁻² dia⁻¹); t_i - temperatura mensal (°C); I - índice térmico anual $\left[I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 t_i) \right]$; a - constante ($a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$); N - fotoperíodo (h).

Na Tabela 4 estão apresentadas as estimativas do erro padrão da estimativa (EPE), concordâncias de Willmott (d), correlações de Pearson (r), coeficientes de confiança (c) e desempenhos de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos das correlações entre os valores de ET_0 pelo método de Penman-Monteith-

FAO 56 com os obtidos pelos métodos estudados. Verifica-se dentre as equações originais, que Priestley & Taylor apresentou menor EPE e maiores valores de “d”, “r” e “c”. Esse resultado corroborou para que esse método fosse o único a receber classificação “boa” segundo Camargo & Sentelhas (1997). Isso

credencia esse método para a estimativa da ET_0 na região norte do Brasil. O método de Priestley & Taylor foi desenvolvido para estimativa da evaporação de superfícies saturadas em uma atmosfera não saturada, que é a condição normal da natureza (Barros et al., 2009; Cavalcante Jr. et al., 2011) e seu desempenho corroborou com os observados por Magalhães & Cunha (2012) estimando ET_0 no Estado de Mato Grosso do Sul; e Marcuzzo et al. (2008) no Estado de São Paulo.

Tabela 4. Estimativa do erro padrão de estimativa (EPE), concordância de Willmott (d), correlação de Pearson (r), coeficiente de confiança (c) e desempenho de Camargo e Sentelhas, obtidos das correlações entre os valores de evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 com os métodos testados.

	Método	ET_0	EPE	d	r	c	Desempenho
	Penman-Monteith-FAO 56	82,30	-	-	-	-	-
Original	Hargreaves-Samani	136,14	55,73	0,4071	0,7245	0,2950	Péssimo
	Jensen-Haise	162,45	83,38	0,3304	0,8002	0,2644	Péssimo
	Linacre	123,10	44,64	0,4357	0,4422	0,1926	Péssimo
	Makkink	171,35	91,54	0,3093	0,8527	0,2637	Péssimo
	Priestley & Taylor	94,51	15,77	0,8427	0,8733	0,7359	Bom
	Thornthwaite	111,08	33,48	0,4962	0,4494	0,2230	Péssimo
Calibrado	Hargreaves-Samani	82,30	17,14	0,8254	0,7245	0,5980	Sofrível
	Jensen-Haise	82,30	13,50	0,8806	0,8002	0,7047	Bom
	Linacre	82,30	36,55	0,5549	0,4422	0,2454	Péssimo
	Makkink	82,30	11,04	0,9152	0,8527	0,7804	Muito bom
	Priestley & Taylor	82,30	10,05	0,9293	0,8733	0,8116	Muito bom
	Thornthwaite	82,30	35,83	0,5626	0,4494	0,2528	Péssimo

Xu & Chen (2005) avaliaram na Alemanha sete métodos para a estimativa da ET_0 , dentre eles, de Priestley & Taylor, comparando-os com dados de lisímetros de pesagem. Os autores concluíram que esse método obteve bons resultados, com erro abaixo de 10%. Essa metodologia é baseada no saldo de radiação e tem sido usada em diversos estudos devido sua simplicidade em relação aos métodos combinados, por não exigir dados de velocidade do vento e umidade relativa do ar.

As demais metodologias receberam classificação “péssima” e não devem ser utilizadas na região supracitada. A metodologia de Jensen-Haise é adequada para regiões áridas e semi-áridas (Cavalcante Jr. et al., 2011), e diante disso, não esperava-se bom desempenho da mesma na região norte brasileira. Souza et al. (2011) avaliando o método de Jensen-Haise em Seropédica-RJ também não encontraram bom desempenho na estimativa da

ET_0 . Os autores demonstraram por meio de seus resultados que a confiança na utilização desse método deve ser reduzida conforme aumente a nebulosidade no dia da estimativa, ou seja, quando a transmitância atmosférica diminuir. Magalhães & Cunha (2012) utilizando o software Sevap, também verificaram baixo desempenho da metodologia de Jensen-Haise para estimativa da ET_0 em Mato Grosso do Sul. Entretanto, Marcuzzo et al. (2008) conseguiram boas estimativas de ET_0 com essa metodologia no Estado de São Paulo.

O método Makkink foi desenvolvido para as condições climáticas de Wageningen, na Holanda, e provavelmente esse foi o fator para tal desempenho. Magalhães & Cunha (2012) no Estado de Mato Grosso do Sul, Cavalcante Jr. et al. (2011) no Semiárido Nordeste, Turco et al. (2008) no Estado de São Paulo e Araújo et al. (2007) em Roraima também verificaram baixo desempenho, entretanto,

nos Estados da Paraíba (Silva et al., 2005), Rio de Janeiro (Mendonça et al., 2003) e Pará (Silva & Costa, 2000), esse método apresentou ótima precisão na estimativa da ET_0 , quando comparadas ao método padrão.

A metodologia de Hargreaves-Samani se destaca por ser bastante simples e de fácil aplicação, necessitando apenas de dados de temperatura e latitude do local, entretanto, devido ao seu baixo coeficiente de confiança e por ter superestimado a ET_0 na presente pesquisa, não apresenta boa alternativa para estimativa de tal parâmetro na região norte do Brasil. Na literatura, Araújo et al. (2007) em Boa Vista-RO, Back (2008) em Urussanga-SC, Barros et al. (2009) em Seropédica-RJ, Pereira et al. (2009) na região da Serra da Mantiqueira-MG e Cunha et al. (2013) em Chapadão do Sul-MS também não obtiveram bom desempenho na estimativa da ET_0 utilizando essa metodologia.

Alguns pesquisadores encontraram bom desempenho do método de Thornthwaite no Brasil (Back, 2008; Syperreck et al., 2008), exceto Araújo et al. (2007) na estimativa da ET_0 no Estado de Roraima.

Exceto para a correlação de Pearson, observa-se que as equações calibradas proporcionaram melhoria nos parâmetros estatísticos na comparação com as equações originais. É oportuno ressaltar que as calibrações foram somente no sentido de ajustar a tendência dos dados em relação ao estimado pelo Penman-Monteith e não alterou a dispersão dos dados. Em ordem, os melhores métodos para a estimativa da ET_0 foram Priestley & Taylor e Makkink, que receberam segundo Camargo &

Sentelhas (1997) classificação “muito boa”. Essa melhoria do método de Makkink, além da calibração, pode ter sido impulsionada por ser derivada do método de Penman-Monteith-FAO 56. A metodologia de Jensen-Haise também apresentou melhoria e recebeu classificação “boa”. Diante disso, quando receber calibração, as metodologias de Priestley & Taylor, Makkink e Jensen-Haise podem ser utilizadas na estimativa confiável da ET_0 na região em estudo.

Os demais métodos receberam classificação “péssima” ou “sofrível” e, portanto, não devem ser utilizados na estimativa da ET_0 na região norte do Brasil.

Na Tabela 5 estão apresentadas as correlações simples entre as ET_0 obtidas pelos diferentes métodos com os elementos climáticos medidos. Verifica-se que a ET_0 obtida por Penman-Monteith-FAO 56 apresentou correlação positiva com a insolação, ou seja, o aumento da insolação proporciona aumento nos valores de ET_0 . De acordo com Cohen (1988), a correlação foi classificada como “muito alta”. Os métodos de Hargreaves-Samani e Priestley & Taylor não apresentaram correlação satisfatória com nenhum elemento climático. Os métodos Jensen-Haise e Makkink apresentaram correlações positivas “muito altas” com a insolação. O método de Linacre apresentou correlação positiva “muito alta” com as temperaturas média e máxima e correlação negativa “muito alta” com a umidade relativa. O método de Thornthwaite apresentou correlação positiva “muito alta” com a temperatura média.

Tabela 5. Correlação entre as evapotranspirações de referência (ET_0) obtidas pelos diferentes métodos com os elementos climáticos medidos.

Método	T	T _{máx}	T _{mín}	n	UR	U ₂	P _{atm}
Penman-Monteith	-0,05 ^{ns}	0,16 ^{**}	-0,20 ^{**}	0,72 ^{**}	-0,65 ^{**}	0,36 ^{**}	-0,10 [*]
Hargreaves-Samani	-0,01 ^{ns}	0,38 ^{**}	-0,27 ^{**}	0,53 ^{**}	-0,31 ^{**}	-0,15 ^{**}	0,04 ^{ns}
Jensen-Haise	0,30 ^{**}	0,44 ^{**}	0,15 ^{**}	0,83 ^{**}	-0,38 ^{**}	0,26 ^{**}	0,29 ^{**}
Linacre	0,71 ^{**}	0,74 ^{**}	0,53 ^{**}	0,44 ^{**}	-0,73 ^{**}	0,50 ^{**}	0,43 ^{**}
Makkink	0,09 [*]	0,28 ^{**}	-0,05 ^{ns}	0,86 ^{**}	-0,37 ^{**}	0,20 ^{**}	0,11 ^{**}
Priestley & Taylor	-0,28 ^{**}	-0,05 ^{ns}	-0,37 ^{**}	0,58 ^{**}	-0,29 ^{**}	-0,02 ^{ns}	-0,17 ^{**}
Thornthwaite	0,75 ^{**}	0,68 ^{**}	0,61 ^{**}	0,50 ^{**}	-0,56 ^{**}	0,54 ^{**}	0,47 ^{**}

T - temperatura média (°C); T_{máx} - temperatura máxima (°C); T_{mín} - temperatura mínima (°C); n - duração brilho solar (horas); UR - umidade relativa (%); U₂ - velocidade do vento (m s⁻¹); e P_{atm} - pressão atmosférica (hPa).

Conclusões

A calibração das equações estudadas proporcionou melhores estimativas da ET_0 ;

O método de Priestley & Taylor pode ser utilizado para estimativa confiável da ET_0 na região norte do Brasil;

Quando calibradas, as metodologias de Makkink e Jensen-Haise podem ser utilizadas na estimativa da ET_0 na região em estudo.

Referências

- ALENCAR, L. P.; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 337-343, 2011.
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) para Boa Vista-RR. **Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.
- BIDLAKE, E. R. Evapotranspiration and canopy resistance at an undeveloped prairie in a humid subtropical climate. **Journal of the American Water Resources Association**, Washington, v. 38, n. 1, p. 197-211, 2002.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.
- CAVALCANTE Jr., E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. supl., p. 1699-1708, 2011.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1988. 569 p.
- CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 143 p. (Irrigation and Drainage paper, 24).
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1961-1999), Versão Revista e Ampliada**. Brasília: INMET, 2010. CD-ROM.
- JENSEN, D. T.; HARGREAVES, G. H.; TEMESGEN, B.; ALLEN, R. G. Computation of ET_0 under nonideal conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 5, p. 394-400, 1997.
- LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 298-306, 2009.
- MAGALHÃES, F. F.; CUNHA, F. F. Desempenho do software Sevap na estimativa da evapotranspiração no Estado de Mato Grosso do Sul. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 16, p. 151-160, 2012.
- MARCUZZO, F. F. N.; ARANTES, E. J.; WENDLAND, E. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 3, p. 323-338, 2008.
- MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 196-202, 2010.
- MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.
- PENMAN, H. L. **Vegetation and hydrology**. Harpenden: Commonwealth Bureau of Soils, 1963. 125 p. (Technical Communication, 53).
- PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa

Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil

- da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.
- SANIJ, H. D.; YAMAMOTO, T.; RASIAH, V. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 91-106, 2004.
- SILVA, F. A. S. **Sistema de Assistência Estatística**. Versão 7.6 beta. Campina Grande: UFCG, 2011.
- SILVA, M. M.; COSTA, A. C. L. Estudo comparativo da evapotranspiração em área de floresta de manguezal na região Bragantina-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBM, 2000. p. 418-421.
- 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**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.
- SOUZA, A. P.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. B. D.; ALMEIDA, F. T.; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.
- SYPPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p. 603-609, 2008.
- TURCO, J. E.; PERECIN, D.; PINTO Jr., D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 63-80, 2008.
- WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.
- XU, C-Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717-3734, 2005.