

## DESEMPENHO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA MICRORREGIÃO DE TOMÉ AÇÚ-PA

**VERA QUEIROZ DE SOUZA<sup>1</sup>; MARYJANE DINIZ DE ARAÚJO GOMES<sup>2</sup>; ALEX PAULO MARTINS DO CARMO<sup>3</sup>; FÉLIX LÉLIS DA SILVA<sup>4</sup>; MAURÍCIO BRUNO PADRO DA SILVA<sup>5</sup>; LAILSON DA SILVA FREITAS<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Graduanda em Agronomia, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: veraqueirozsouza95@gmail.com

<sup>2</sup>Professora, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: gomes-mary@hotmail.com

<sup>3</sup>Doutorando em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes – RJ, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, CEP: 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, Email: alex.taa97@gmail.com

<sup>4</sup>Professor, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: lixlellis@yahoo.com.br

<sup>5</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia Irrigação e Drenagem pela Universidade Estadual de São Paulo Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Faculdade e Ciências Agrônômicas, Botucatu – SP, Brasil, Email: mauricio.prado19@hotmail.com

<sup>6</sup>Mestrando em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes – RJ, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, CEP: 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, Email: lailsonfreitas222@gmail.com

### 1 RESUMO

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é um parâmetro que permite o gerenciamento das atividades agrícolas de uma região e o uso racional dos recursos hídricos, possibilitando o cálculo do volume de água a ser aplicado. Objetivou-se neste trabalho, avaliar o desempenho de métodos empíricos para o cálculo da evapotranspiração de referência na microrregião de Tomé-Açu, no estado do Pará, Brasil. O desempenho dos modelos simplificados foi verificado por meio de regressão linear simples, utilizando os indicadores estatísticos *Mean Bias Error (MBE)*, *Relative Mean Bias Error (rMBE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)* e *Relative Root Mean Square Error (rRMSE)*. Os modelos que apresentam menor dispersão dos dados, em comparação com a equação padrão de Penman Monteith, foram Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Turc, Makkink e Priestley-Taylor. Ao analisar a acurácia dos modelos, verificou-se que os modelos de Hargreaves-Samani, Makkink e Camargo foram classificados como bons. Os métodos de Linacre, Blaney-Criddle e Jensen-Haise não são recomendados para a microrregião de Tomé-Açu. Na falta dos dados necessários para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método padrão de Penman-Monteith – FAO 56, a equação que obteve melhor ajuste foi o modelo de Hargreaves-Samani, podendo ser aplicada para a região em estudo.

**Palavras-chave:** Região Norte, Penman-Monteith, Hargreaves-Samani.

**SOUZA, V. Q.; GOMES, M. D. A.; CARMO, A. P. M.; SILVA, F. L.; SILVA, M. B. P.; FREITAS, L. S.**

**PERFORMANCE OF MODELS TO ESTIMATE THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN THE TOMÉ AÇÚ-PA MICROREGION**

**2 ABSTRACT**

The estimation of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is a parameter that allows the management of agricultural activities in a region and the rational use of water resources, enabling the calculation of water volume to be applied. This study aimed to evaluate the performance of empirical methods to calculate the reference evapotranspiration in the microregion of Tomé-Açú, in the state of Pará, Brazil. The performance of the simplified models was verified through simple linear regression, using the statistical indicators Mean Bias Error (MBE), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE), and Relative Root Mean Square Error (rRMSE). The models that presented lower data dispersion were Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Turc, Makkink, and Priestley-Taylor, compared to the standard equation of Penman-Monteith. When analyzing the accuracy of the models, the models of Hargreaves-Samani, Makkink, and Camargo were classified as good. The models of Linacre, Blaney-Cridle, and e Jensen-Haise are not recommended to the microregion of Tomé-Açu. In the lack of the necessary data to estimate the reference evapotranspiration by the standard method of Penman-Monteith - FAO 56, the equation that obtained the best adjust was the model of Hargreaves-Samani. Thus, it may be applied for the studied region.

**Keywords:** North Region, Penman-Monteith, Hargreaves-Samani.

**3 INTRODUÇÃO**

As decorrentes mudanças climáticas nos últimos tempos têm potencial de causar grandes impactos sobre os recursos hídricos em âmbito global. Dentre as diversas consequências provenientes do aquecimento global, está a mudança climática, alterando o padrão climático em âmbito regional e consequentemente ocasionando mudanças em padrões de chuva e evapotranspiração (SOUZA FILHO *et al.*, 2016).

A agricultura é uma atividade extremamente influenciada pelas variações climáticas, cujas alterações podem afetar a produtividade dos cultivos, o manejo das culturas e a qualidade do produto. Chuvas extremas, granizos, ocorrência de geadas ou estiagens prolongadas podem influenciar nas práticas agrícolas (DUARTE; WOLLMANN, 2017). Tal dependência se

deve, sobretudo, pela disponibilidade de água no solo, no entanto, essa dependência pode ser atenuada pelo uso da irrigação.

Devido ao aumento da escassez, é imprescindível o manejo racional do recurso hídrico na agricultura irrigada, sendo necessário o conhecimento sobre o consumo hídrico das culturas. Andrade *et al.* (2016) afirmam que há diferentes processos aplicáveis para o adequado manejo da irrigação e dentre esses, se destacam os que utilizam a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) como parâmetro, como na proposta de Doorenbos e Pruitt (1977), em que o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) é obtido por meio do produto entre a evapotranspiração de uma cultura de referência e um coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>).

A evapotranspiração consiste no processo de perda de água do solo por evaporação e transpiração pela planta para a

atmosfera, portanto, é um parâmetro essencial para o dimensionamento hidráulico dos sistemas de irrigação e o manejo da água (OLIVEIRA *et al.*, 2017). A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) recomenda estimar a ETo pelo método proposto por Penman-Monteith, publicado no Boletim 56 da FAO, usado como base para estimar a ETo e para a calibração dos modelos existentes (ALLEN *et al.*, 1998).

Apesar da equação de Penman-Monteith (FAO-56) ser recomendada como método padrão para estimar a ETo, sua utilização torna-se limitada devido ao número de informações requeridas pelo modelo. As variáveis de entrada da equação nem sempre estão disponíveis devido aos investimentos necessários para a aquisição e manutenção dos sensores (PALARETTI; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2014a).

Além da equação de Penman-Monteith, existem os métodos simplificados para determinar a ETo, os quais requerem menor quantidade de variáveis climáticas. Na falta de dados climáticos para a determinação da ETo pelo método padrão, o boletim 56 da FAO indica outros métodos, como o modelo desenvolvido por Hargreaves-Samani, o qual pode ser utilizado para determinar a ETo quando se dispõe somente dos dados de temperatura do ar e a radiação solar (ALLEN *et al.*, 1998). Na Região Amazônica, a distribuição das estações meteorológicas é irregular; além disso, há limitações na obtenção dos dados como possibilidade de falhas nos registros e/ou dificuldade no acesso para a realização de manutenção nos equipamentos, o que limita o estudo de variáveis climáticas (SOUTO; TAVARES; BELTRÃO, 2019).

A determinação da ETo é indispensável para a elaboração de projetos e manejo da irrigação, pois a partir dela é possível determinar a demanda hídrica das culturas. Apesar da irrigação ser uma tecnologia muito utilizada, principalmente, em regiões onde ocorre escassez hídrica, em

decorrência do menor volume de chuvas, em regiões onde o regime de chuva é maior, como no estado do Pará, essa técnica é utilizada nos períodos de menor precipitação, de forma a complementar a demanda hídrica das culturas agrícolas. Sendo assim é de fundamental importância os estudos sobre métodos simplificados para esta região.

O município de Tomé-Açu está situado na Mesorregião do Nordeste Paraense, na microrregião de mesmo nome, considerada um dos polos de desenvolvimento da agricultura comercial mais importante do estado do Pará, na qual utiliza-se sistemas de cultivo irrigado (BELATO; SERRÃO, 2019).

Considerando a importância da região de Tomé-Açu no que tange a produção agrícola de diversas culturas, aliada à necessidade do manejo racional dos recursos hídricos, sobretudo, na agricultura irrigada, bem como a falta de informações necessárias para determinação da demanda hídrica real das culturas, dentre elas, a ETo Além disso, os modelos empíricos são de grande importância no estudo da ETo, no entanto é interessante que as pesquisas tragam novidades teóricas/metodológicas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de métodos empíricos para o cálculo da evapotranspiração de referência na microrregião de Tomé-Açu, no estado do Pará.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Local de estudo e medidas

O estudo foi realizado considerando os dados climatológicos da estação convencional de Tomé Açu (02°24'S e 48°09'W), que faz parte da Mesorregião do Nordeste Paraense, referente a um período de 12 anos (2007 a 2018), obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e

Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O município de Tomé-Açu localiza-se na parte central do nordeste paraense, na microrregião de Tomé-Açu, entre as coordenadas geográficas de 02°54'45" e 03°16'36" S e de 47°55'38" e 48°26'44" W, altitude de 45m e com superfície de aproximadamente 5.179 km<sup>2</sup>. A microrregião é formada por cinco (5) municípios: Acará, Concórdia do Pará, Moju, Tailândia e Tomé-Açu (RODRIGUES *et al.*, 2001; CORDEIRO *et al.*, 2017).

O município de Tomé Açu possui clima quente e úmido, enquadrando-se ao tipo climático Ami da classificação de Köppen, possuindo uma estação seca bem definida, com o mês de menor precipitação de 60 mm e temperatura média anual de 26,4 °C (PACHÊCO; BASTOS; CREÃO, 2009).

## 4.2 Determinação dos modelos utilizados na pesquisa

Foram utilizadas planilhas eletrônicas do programa Excel para a tabulação dos dados meteorológicos. Posteriormente, foi realizado o cálculo da ETo por meio dos modelos de Penman-Monteith, Allen *et al.* (1998), Hargreaves e Samani (1985), Blaney e Criddle (1950), Camargo (1971), Priestley e Taylor (1972), Turc (1961), Makkink (1957), Jensen e Haise (1963) e Linacre (1977) descritos na Tabela 1. Os dados tabulados são dados diários, sendo assim, foi estimada por meio dos modelos, a ETo (mm dia<sup>-1</sup>) de cada dia dos anos avaliados, descritos nas equações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

$$E_{To} (P-M) = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + Y * \frac{900}{T_{méd} + 273} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + Y (1 + 0,34 * U_2)} \quad (1)$$

$$E_{To} (H-S) = 0,0023 * (T_{méd} + 17,8) * (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} * R_a \quad (2)$$

$$E_{To} (B - C) = a + b * (p * (0,46 * T_{méd} + 8,13)) \quad (3)$$

$$E_{To} (C) = F * Q_o * T_{méd} * ND \quad (4)$$

$$E_{To} (P - T) = \frac{\alpha}{\lambda} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (R_n - G) \quad (5)$$

$$E_{To} (T) = 0,013 * \frac{T_{méd}}{T_{méd} + 15} * \frac{23,8856 * R_s + 50}{\lambda} \quad \text{para } UR \geq 50 \quad (6)$$

$$E_{To} (M) = 0,61 * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_s}{\lambda} - 0,12 \quad (7)$$

$$E_{To} (J - H) = R_s (0,025 * T_{méd} + 0,078) \quad (8)$$

$$E_{To} (L) = \frac{500 \left( \frac{T_{méd} + 0,006 * h}{100 - \varphi} \right) + 15 (T_{méd} - T_{po})}{(80 - T_{méd})} \quad (9)$$

Em que: R<sub>n</sub> = saldo de radiação, em MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; G = fluxo de calor no solo, em MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; T<sub>méd</sub> = temperatura média do ar °C; U<sub>2</sub> = velocidade média diária do vento a

2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> = pressão de vapor de saturação (kPa); e<sub>a</sub> = pressão de vapor real (kPa); Δ = tangente da curva de pressão de saturação de vapor, em kPa °C<sup>-1</sup>; γ

= constante psicométrica, kPa °C; T<sub>máx</sub> = temperatura máxima do ar, em °C; T<sub>mín</sub> = temperatura mínima do ar, em °C; R<sub>a</sub> = radiação solar extraterrestre, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; p = percentagem das horas de luz solar possível em relação ao total anual, para um dado mês e latitude; UR<sub>min</sub> = umidade relativa mínima diária (%); n = duração da insolação diária (h); N = duração máxima possível da insolação diária (h); F = fator de ajuste que varia de acordo com a temperatura média anual do local (F = 0,01 para T até 23 °C; F = 0,0105 para T = 24 °C; F = 0,011 para T = 25 °C; F = 0,0115 para T = 26 °C e F = 0,012 para T > 26 °C); ND = número de dias do período; Q<sub>o</sub> = irradiação solar no topo da atmosfera (mm dia<sup>-1</sup>); ND = número de dias do período avaliado; λ = calor latente (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>); α = 1,26; Δ = curva de saturação de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>s</sub> = radiação solar (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); UR = umidade relativa do ar (%); h = altitude local (m); φ = latitude do lugar; T<sub>po</sub> = temperatura média do ponto de orvalho (°C); e e<sub>a</sub> = pressão de vapor.

Vale salientar que as equações empíricas foram validadas para regiões e clima específicos, sendo as equações de Hargreaves e Samani, (1985) para regiões áridas; Blaney e Criddle (1950) para regiões semiáridas; Camargo, (1971) para clima áridos e super úmidos; Priestley e Taylor (1972) para clima árido; Turc, (1961) para regiões costeiras e úmidas; Makkink, (1957) para condições climáticas úmidas; Jensen e Haise (1963) para regiões áridas; Linacre, (1977) climas subtropical e semiárido (FERNANDES *et al.*, 2010).

Considerando a limitação de dados meteorológicos na região de estudo e que de maneira geral, em razão da variação existente entre as variáveis climáticas, estudos para validação de modelos empíricos que utilizem um menor número de variáveis climáticas se torna indispensável, pois apesar de nem todas as equações serem validadas para a região de estudo, a literatura cita apenas a recomendação de uso.

Portanto, na falta de pesquisa e dados publicados para determinadas regiões, entende-se que é necessário a aplicação dessas equações para validar ou não o seu uso na região específica, considerando que na literatura se descreve apenas a recomendação de regiões climáticas de aplicabilidade do modelo.

### 4.3 Avaliação do desempenho dos modelos

Os modelos foram comparados com o modelo padrão que calcula a ETo pela equação de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). Posteriormente, os modelos foram avaliados a partir do grau de correlação, em seguida, foram utilizados os indicadores de qualidade de ajuste estatístico *Mean Bias Error* (MBE), *Relative Mean Bias Error* (rMBE %), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Relative Root Mean Square Error* (rRMSE %) e o índice de concordância de Willmott (d). Os índices foram calculados utilizando as equações 1, 2, 3, 4 e 5 (STONE; SELLARS; KRESS, 1979; WILLMONTT, 1981; MA e IQBAL, 1984).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad (10)$$

$$rMBE(\%) = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\bar{O}} \quad (11)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$rRMSE(\%) = 100 * \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\bar{O}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (14)$$

Em que: S<sub>i</sub> representa os valores estimados no i-ésimo tempo; O<sub>i</sub> são os valores medidos no i-ésimo tempo; O são os

valores médios medidos e  $n$  é o número de observações. Sendo a unidade de saída a mesma da variável de entrada testada  $\text{mm dia}^{-1}$  para BEM, RMSE ou porcentagem (%) para rMBE e rRMSE.

Os índices estatísticos citados permitem fazer avaliações sobre os valores encontrados pelos modelos e os valores medidos em campo. O MBE indica a tendência dos modelos em subestimar ( $\text{MBE} < 1$ ) ou superestimar ( $\text{MBE} > 1$ ) os valores previstos, porém não informar sobre o espalhamento dos dados. O RMSE informa sobre o espalhamento dos dados avaliados. O índice  $d$  de Willmott pode variar de 0 a 1, e serve como indicador da exatidão do modelo avaliado, em que valores próximos de 1 indicam maior exatidão.

O rRMSE é utilizado por alguns autores como uma escala classificatória para diferentes intervalos a fim de avaliar a acurácia dos modelos (HEINEMANN *et al.*, 2012). A classificação dos modelos pode ser excelente ( $\text{rRMSE} < 10\%$ ), bom ( $10\% \leq \text{rRMSE} < 20\%$ ), aceitável ( $20\% \leq \text{rRMSE} < 30\%$ ) ou pobre ( $\text{rRMSE} \geq 30\%$ ).

Neste trabalho, quando o rRMSE for maior ou igual a 30%, será utilizada a terminologia “não aceitável” devido a melhor conformidade do termo técnico.

Os índices estatísticos obtidos para o presente trabalho foram calculados por meio do desenvolvimento e execução de um *script* no *software* Microcal TM Origin® versão 6.0.

Considerando a regressão linear de  $Y$  com variável aleatória no tempo  $X$ , a hipótese nula ( $H_0$ ) de que não existe uma tendência foi testada por meio do teste  $t$  de Student, com  $n-2$  graus de liberdade. Quando existiu uma tendência, a hipótese nula foi rejeitada, isto ocorre quando o  $t$  calculado é maior, em valor absoluto, do que o valor crítico do  $t$  tabelado, determinado a um nível de significância  $\alpha$ . Nesta pesquisa foi utilizado o nível de significância de 5%, sendo o  $t$  de Student calculado pela Equação 6, demonstrada abaixo:

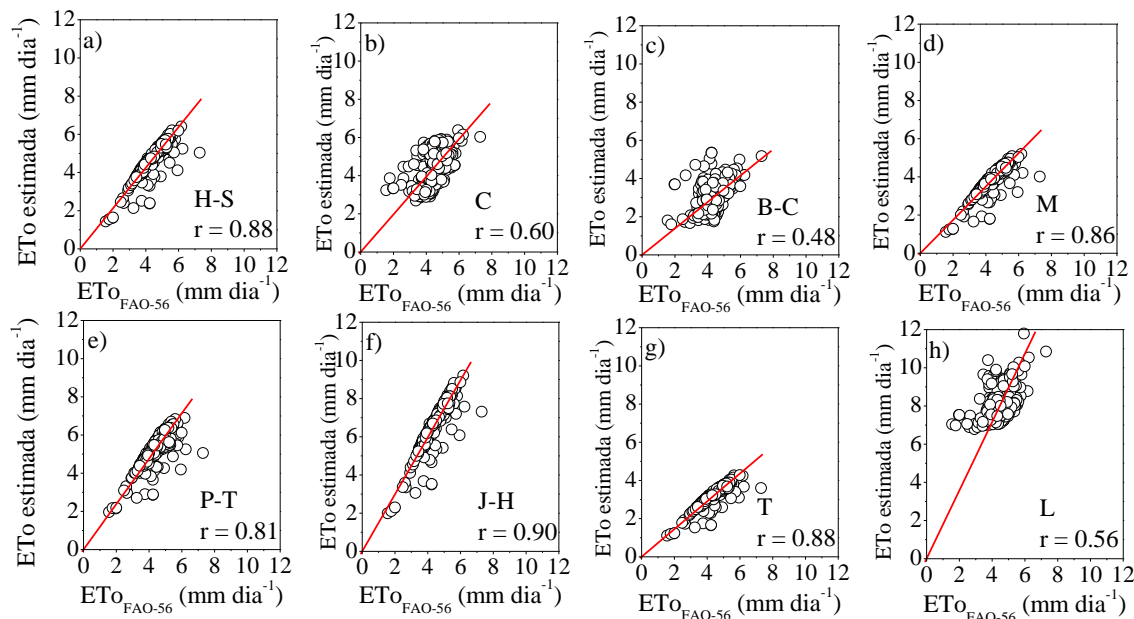
$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{\beta_1}{S/\sqrt{SSx}} \quad (15)$$

Em que:  $n$  representa o tamanho da amostra;  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson;  $s$  é o desvio padrão dos resíduos;  $\beta_1$  é o coeficiente angular da regressão; e  $SSx$  é a soma dos quadrados da variável independente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 (a, b, c, d, e, f, g, h), é apresentado o comportamento da ETo resultante dos métodos simplificados em relação ao método padrão, correspondente aos métodos de Hargreaves e Samani, Camargo, Blaney e Criddle, Makkink, Priestley e Taylor, Jensen e Haise, Turc e Linacre, respectivamente.

**Figura 2.** Correlações entre a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)-FAO 56 estimada pelo método de Penman-Monteith e os modelos avaliados



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Em que: *H-S*= Hargreaves e Samani, *C*= Camargo, *B-C*= Blaney e Criddle, *M*= Makkink, *P-T*= Priestley e Taylor, *J-H*=Jensen e Haise, *T*=Turc e *L*=Linacre.

Os valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ) para a, b, c, d, e, f, g, e h foram 0,88; 0,60; 0,48; 0,86; 0,81; 0,90; 0,88 e 0,56, respectivamente. Segundo Pisani Júnior, Castro e Costa (2018), o coeficiente de correlação  $r$  tem por objetivo medir o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas, com valores entre -1 e 1 refletindo a intensidade de uma relação linear entre os dados.

Dessa forma, pela correlação, pode-se afirmar que os modelos de Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Turc, Makkink e Priestley e Taylor apresentaram maiores correlações, comparados com o modelo padrão, podendo-se afirmar que para esses modelos, os valores apresentaram menor dispersão dos dados, com valores mais próximos de 1. Os resultados corroboram com os encontrados por Lobato (2019), que ao avaliar as mesmas equações para o nordeste paraense, encontrou valores de  $r$  também superiores a 80%, no entanto, para a

equação de Hargreaves-Samani, o autor encontrou valor de 0,35. Da mesma forma, Carvalho *et al.* (2018) encontraram valor de 0,51 para o  $r$ , utilizando a equação de Hargreaves-Samani no estado do Ceará.

Os métodos de Camargo, Linacre e Blaney-Criddle apresentaram menor  $r$ , com valores iguais a 0,6; 0,56 e 0,48, respectivamente. Assim, pode-se afirmar que esses métodos apresentaram maior dispersão dos dados em relação aos demais, com valores mais distantes de 1, tornando-os modelos não confiáveis para utilização na falta dos dados necessários para determinação da ET<sub>o</sub> pelo método padrão (Penman-Monteith FAO 56).

Souza e Sousa (2020), analisando as equações simplificadas em Rio Branco, AC, cidade do Acre que apresenta características climáticas semelhantes à Tome Açu, encontraram  $r$  baixo para as equações de Linacre e Carmargo, corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa. Sanches *et al.* (2015), analisando equações simplificadas para algumas regiões do estado do Pará, constataram que a

metodologia de Linacre apresentou o pior ajuste em comparação com o método padrão.

O método de Blaney-Criddle apresentou desempenho baixo, analisado pelo  $r$  (0,48), assim como foi encontrado por Lima *et al.* (2019), que analisando equações empíricas simplificadas comparadas com a equação de Penman-Monteith para seis diferentes climas, encontraram um  $r$  de 0,41 na correlação de regressão linear simples com a equação de Blaney Criddle para Belém, PA.

As equações de Camargo, Linacre e Blaney-Criddle não utilizam nos seus dados de entrada a radiação solar, o que pode ocasionar um baixo desempenho quando comparadas à equação de Penman-Monteith FAO-56. Rigoni *et al.* (2013), ao avaliar equações que usam ou não radiação solar, destacaram que as equações que apresentaram um baixo coeficiente de correlação foram aquelas não baseadas na radiação, corroborando com os resultados desta pesquisa.

Assim como o modelo de Linacre, Blaney- Criddle foi desenvolvido para a

estimativa de ETo mensal e Camargo para períodos de 10 a 30 dias. Sendo assim, possivelmente, o baixo desempenho encontrado pode estar relacionado ao fato de os modelos terem sido usados em escala de tempo diária, e não em escala mensal para a qual foram desenvolvidos.

Dessa forma, pela análise de regressão, o método simplificado de Jensen-Haise para as condições estudadas se mostrou como o método mais indicado para a determinação da ETo, pois foi, dentre os métodos avaliados, o que mais se aproximou do método padrão, apresentando o coeficiente de correlação ( $r$ ) de 0,90.

Hallal *et al.* (2017) constataram que os métodos que levam em conta a radiação solar incidente na superfície para estimar a ETo, como o de Jensen-Hayse, apresentaram melhor desempenho quando comparados com o método padrão ( $r = 0,81$ ).

Para o teste  $t$  de Student com nível de 5% de significância, todas as equações simplificadas mostraram tendência estatisticamente significativas com o modelo padrão (Tabela 2).

**Tabela 2.** Indicadores do desempenho das equações simplificadas de Hargreaves e Samani (H-S), Camargo (C), Blaney e Criddle (B-C), Makkink (M), Priestley e Taylor (P-T), Jensen e Haise (J-H), Turc (T) e Linacre (L) para a microrregião de Tomé-Açu, PA

Modelos (ETo)	rMBE	MBE	rRMSE	RMSE	d	t
	(%)	(mm dia <sup>-1</sup> )	(%)	(mm dia <sup>-1</sup> )	(-)	(-)
H-S	6,62	0,29	10,73	0,46	0,90	14,70*
C	-1,01	-0,04	18,17	0,79	0,74	1,04*
B-C	-30,28	-1,31	34,50	1,49	0,43	34,29*
M	-12,41	-0,54	14,90	0,65	0,79	28,17*
P-T	19,80	0,86	22,48	0,97	0,68	34,85*
J-H	49,65	2,15	51,31	2,22	0,43	71,76*
T	-27,04	-1,17	28,22	1,22	0,55	62,69*
L	81,97	3,55	83,52	3,61	0,25	95,85*

**Fonte:** Elaborado pelos autores. rMBE: Relative Mean Bias Error; MBE: Mean Bias Error; rRMSE: Relative Root Mean Square Error; RMSE: Root Mean Square Error; d: Índice de concordância de Willmott ; t: Teste  $t$  de Student (\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste  $t$  de Student:  $t > t_{crítico} - rejeita-se H_0$ ).



A partir da análise dos modelos, observa-se que os métodos de Blaney-Criddle, Turc, Makkink e Camargo apresentaram subestimativa em relação ao método padrão, com subestimativa de -30,28; -27,04; -12,41 e -1,01%, respectivamente. Essa porcentagem representa -1,31; -1,17; -0,54 e -0,04 mm dia<sup>-1</sup>, observando-se que o método de Camargo apesar de ter subestimado o valor em comparação ao método padrão, tal subestimativa foi bem menor em relação aos demais.

A subestimativa nos dados é uma característica da equação de Makkink, sendo encontrado maiores valores de subestimativa nos períodos mais secos do que em períodos mais úmidos do ano. Por esses motivos, o modelo de Makkink pode ser recomendado para condições climáticas úmidas, apresentando como vantagem a utilização apenas de dados de temperatura do ar e radiação solar (PALARETTI; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2014b; CAVALCANTI JÚNIOR *et al.*, 2011; FERNANDES *et al.*, 2010).

Para os modelos de Linacre, Jansen-Haise, Priestley-Taylor e Hargreaves Samani foi observada superestimação dos valores em relação ao método padrão, representando uma superestimação de 3,55; 2,15; 0,86 e 0,29 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Observa-se que os modelos de Linacre e Jansen-Haise apresentaram a maior superestimação. Assim como neste trabalho, Rocha *et al.* (2015) encontraram valores de ETo para Hargreaves-Samani que superestimaram o método padrão e Tanaka *et al.* (2016) encontraram resultados com superestimação para o método de Linacre no estado do Mato Grosso.

No índice RMSE para os modelos avaliados, os resultados obtidos em ordem crescente foram: Hargreaves-Samani (0,46 mm dia<sup>-1</sup>), Makkink (0,65 mm dia<sup>-1</sup>), Camargo (0,79 mm dia<sup>-1</sup>), Priestley-Taylor (0,97 mm dia<sup>-1</sup>), Turc (1,22 mm dia<sup>-1</sup>), Blaney-Criddle (1,49 mm dia<sup>-1</sup>), Jansen-

Haise (2,22 mm dia<sup>-1</sup>) e Linacre (3,61 mm dia<sup>-1</sup>).

Ao utilizar a escala classificatória para os intervalos de rRMSE com objetivo de avaliar a acurácia dos modelos estudados, verificou-se que os modelos de Blaney-Criddle, Jansen-Haise e Linacre foram classificados como “não aceitável”, com valores de rRMSE de 34,5; 51,31 e 83,52%, respectivamente.

Os modelos de Priestley-Taylor e Turc foram classificados nesta pesquisa para os dados avaliados como “aceitável”, com valores de 22,48 e 28,22%. Já os modelos de Hargreaves-Samani, Makkink e Camargo obtiveram “bom” na classificação, com valores de 10,73; 14,90 e 18,17%, respectivamente. Assim, nenhuma das equações foram classificadas como “excelente” segundo a classificação de Heinemann *et al.* (2012).

Na avaliação dos modelos para o índice d de Willmott, as equações de Hargreaves-Samani, Makkink e Camargo apresentaram maior concordância com o método padrão, com valores de 0,9; 0,79 e 0,74, respectivamente, podendo assim, serem considerados os métodos com melhor exatidão para os dados em questão. Os métodos de Blaney Criddle, Priestley e Taylor, Linacre, Jensen Haise e Turc apresentaram menor concordância com o método padrão, com valores variando entre 0,25 e 0,68.

Assim, a utilização conjunta dos indicadores estatísticos testados, nos permite fazer uma avaliação com maior precisão do desempenho dos modelos em relação ao método padrão (SOUZA *et al.*, 2011). Dessa forma, o método de Camargo apresentou pequena subestimativa (0,04 mm dia<sup>-1</sup>) e boa concordância (d = 0,74), sendo considerado um bom modelo para a estimativa da ETo na microrregião de Tomé-Açu, PA.

De forma semelhante, o modelo de Makkink também apresentou baixa subestimativa (0,54 mm dia<sup>-1</sup>) e boa

concordância ( $d = 0,79$ ), sendo também considerado um bom modelo para a estimativa da ETo na microrregião de Tomé-Açu, PA, assim como o método de Hargreaves-Samani ( $d = 0,90$ ), que também foi classificado como um bom modelo, apresentando baixa superestimação ( $0,29 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

Ao analisar equações simplificadas na Região Norte do Brasil, Lobato (2019) encontrou desempenho bom e pobre para os métodos de Makkink e Jansen-Haise, respectivamente, confirmando os resultados desta pesquisa. Todavia, ao avaliar as equações de Hargreaves-Samani, Linacre e Camargo, o autor obteve classificação aceitável, diferindo dos resultados desta pesquisa, na qual o método de Hargreaves-Samani teve um desempenho bom e Linacre um desempenho não aceitável.

Apesar do método de Hargreaves-Samani superestimar os valores da ETo em regiões úmidas, o valor da superestimação nesta pesquisa em relação ao método padrão foi um valor considerado baixo, apresentando um bom ajuste entre os valores estimados e os valores calculados pela equação padrão de Penman-Monteith. Considerando que o modelo de Hargreaves-Samani necessita de menores quantidade de dados de entrada, na falta de dados para o uso da equação padrão, recomenda-se o uso desse método para a estimativa da ETo na região de estudo.

## 6 CONCLUSÕES

O modelo de Hargreaves-Samani obteve o melhor ajuste, sendo o mais indicado para uso na microrregião de Tomé-Açu na falta dos dados necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método padrão de Penman-Monteith – FAO 56.

As utilizações dos modelos de Linacre, Blaney-Criddle e Jensen-Haise não

são recomendadas para a microrregião de Tomé-Açu.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage paper, n. 56).
- ANDRADE, A. D.; MIRANDA, W. L.; CARVALHO, L. G.; FIGUEIREDO, P. H. F.; SILVA, T. B. S. Desempenho de métodos de cálculo do coeficiente de tanque para estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 1, p. 119-130, 2016.
- BELATO, L. B.; SERRÃO, S. L. C. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracajú, v. 10, n. 1, p. 131-145, 2019.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington, DC: USDA, 1950. (Technical paper, n. 96).
- CAMARGO, A. P. **Balanco hídrico no estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: IAC, 1971. (Boletim, n. 116).
- CARVALHO, T. A.; BRASIL, J. B.; LIMA JÚNIOR, J. C.; MACÊDO, K. G. Evapotranspiração de referência para Campos Sales (CE): modelos combinados e empíricos. **Revista Geonorte**, Alvarães, v. 9, n. 32, p. 123-136, 2018.
- CAVALCANTI JÚNIOR, L. C. C.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de

referência para as condições do semiárido nordestino. **Ciências Agrárias**. Londrina, v. 32, n. 1, p. 1699-1708, 2011.

CORDEIRO, I. M. C. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; SCHWARTZ, G.; OLIVEIRA, F. A. **Nordeste Paraense: Panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias**. Belém: EDUFRA, 2017.

DUARTE, V. A.; WOLLMANN, C. A. Análise das adversidades climáticas na produção de tabaco na bacia hidrográfica do Alto Jacuí/RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 39, n. edição especial, p. 219-234, 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. (Irrigation and Drainage paper, n. 24).

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O. **Evapotranspiração – Uma revisão sobre os métodos empíricos**. 1. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010.

HALLAL, M. O. C.; SCHOFFEL, E. R.; BRIXNER, G. F.; CUNHA, A. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas, Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Agrárias - Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém PA, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2017.

HARGREAVES, G. L.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of the irrigation and drainage division-ASCE**, New York, v. 111, n. 1, p. 113-124, 1985.

HEINEMANN, A. B.; VAN OORT, P. A. J.; FERNANDES, D. S.; MAIA, A. H. N. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation.

**Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p. 572-582, 2012.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE**, New York, v. 4, n. 1, p. 15-41, 1963.

LIMA, J. G. A.; VIANA, P. C.; ESPÍNOLA SOBRINO, J.; COUTO, J. P. C. Comparação de métodos de estimativa de ETo e análise de sensibilidade para diferentes climas brasileiros. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 3, p. 538-551, 2019.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

LOBATO, W. T. S. **Equações empíricas para determinação da evapotranspiração de referência no Nordeste Paraense**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço. 2019.

MA, C. C. Y.; IQBAL, M. Statistical comparison of solar radiation correlations. **Solar Energy**, Kidlington, v. 33, n. 2, p. 143-148, 1984.

MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 5, n. 2, p. 290-305, 1957.

OLIVEIRA, G. M.; SANTIAGO, E. J. P.; RAMOS, M. D. M. V. B.; CARVALHO ROCHA, R.; GONÇALVES, I. S.; SILVA, R. R. Estimativa da evapotranspiração de referência para ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 21-30, 2017.

- PACHÊCO, N. A.; BASTOS, T. X.; CREÃO, L. G. C. **Boletim agrometeorológico de 2008 para Tomé-Açu, PA**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009.
- PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 2, p. 299-306, 2014a.
- PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em regiões citrícolas paulistas. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 38-47, 2014b.
- PISANI JUNIOR, R.; CASTRO, M. C. A. A.; COSTA, A. A. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 415-424, 2018.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux on evaporation using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Washington, DC, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.
- RIGONI, E. R.; OLIVEIRA, G.; BISCARO, G. A.; QUEIRÓZ, M.; LOPES, A. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 21, n. 6, p. 547-572, 2013.
- ROCHA, I. P.; LIMA, N. S.; CHAGAS, R. M.; ALMEIDA, G. L. P. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Garanhuns, PE. **Revista GEAMA**, Recife, v. 1, n. 2, p. 112-127, 2015.
- RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L.; ROLLIM, P. A. M.; SANTOS, E.; REGO, R. S.; SILVA, J. M. L.; GAMA, J. R. N. **Caracterização e classificação dos solos do Município de Tomé-Açu, PA**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001.
- SOUZA ILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. S.; SILVA, S. M. O.; AQUINO, S. H. S. Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, a agricultura e o setor elétrico brasileiro. In: RODRIGUES, L. N.; SHULER A. E. (org.) **Água: Desafios para a sustentabilidade da agricultura**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2016. cap. 1, p. 19-65.
- SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 13, n. 2, p. 19-31, 2015.
- SOUTO, J. I. O.; TAVARES, P. A.; TRINDADE, A. R.; BELTRÃO, N. E. S. Análise espacial de índices de extremos climáticos no nordeste paraense, Pará: um estudo com dados da CPC Morphing Technique. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19, Santos-SP. **Anais [...]** Santos: INEPE, 2019. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3UCAT7H>. Acesso em: 06 outubro 2022.
- 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, DF, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.

SOUZA, M. L. A.; SOUSA, J. W.  
Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 254-267, 2020.

STONE, D. E.; SELLARS, S. C.; KRESS, W. J. Ontogeny of exineless pollen in *Heliconia*, a banana relative. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, Louis, v. 66, p. 701-730, 1979.

TANAKA, A. A.; SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; SILVA, A. C.; GOMES, A. W. A.

Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 91-104, 2016.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Journal of Annals Agronomy**, Cairo, v. 12, [s. l.], p. 13-14, 1961.

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