

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE AGRONOMIA

JOÃO VICTOR GÓES BARBOSA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE MAUÉS,
AMAZONAS

ITACOATIARA – AM

2021

JOÃO VICTOR GÓES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE MAUÉS,
AMAZONAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

ORIENTADOR: PROF. DR. ARISTÓTELES DE JESUS TEIXEIRA FILHO

ITACOATIARA – AM

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B238a Barbosa, João Victor Góes
Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Maués, Amazonas / João Victor Góes Barbosa . 2021
15 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Aristóteles de Jesus Teixeira Filho
TCC de Graduação (Agronomia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Irrigação. 2. Camargo-Sentelhas. 3. Penman-Monteith. 4. Hargreaves. I. Teixeira Filho, Aristóteles de Jesus. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

JOÃO VICTOR GÓES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE MAUÉS,
AMAZONAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Aprovado em 29 de novembro de 2021

BANCA EXAMINADORA



Dr. Aristóteles de Jesus Teixeira Filho

Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia/UFAM



Dra. Edivania dos Santos Schropfer

Faculdade de Ciências Agrárias/UFAM



Dr. Jhony Vendruscolo

Faculdade de Ciências Agrárias/UFAM

Dedico a todos que sempre acreditaram em mim, me incentivaram e torceram pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, essa força poderosa, que sempre me auxiliou em todos os momentos da minha vida, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai Enaldo Barbosa e a minha mãe Luziane Góes, por toda ajuda financeira, pela imensa dedicação em todo momento da minha vida e por sempre me motivarem a estudar e seguir meus sonhos.

À minha avó Maria Daluz por estar ao meu lado e por cuidar de mim desde os meus quatro anos de idade.

Aos meus tios e tias que sempre me ajudaram, sempre me apoiaram e sempre gostaram de ouvir histórias sobre o curso de agronomia.

À Universidade Federal do Amazonas pelo apoio financeiro concedido à realização desta pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia por fornecer todos os dados necessários à realização desta pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aristóteles de Jesus Teixeira Filho pelos ensinamentos, dedicação, confiança e pela oportunidade oferecida.

Aos meus amigos da faculdade, em especial ao Khalled Eufrázio, ao Felipe Fernandes, ao Déric Arruda, ao Journey Moreira, à Mayana Jacquiminouth, à Déborah Santos e à Kamila Dessimoni, por toda ajuda nesse percurso, pela troca de experiências vividas, pela amizade e pelo encorajamento nos momentos difíceis dessa vida dentro e fora da universidade, muito obrigado!

“De fato, às vezes os homens podem ter essa faceta rude, mas isso não passa de um meio para conquistar e proteger algo que seja muito precioso para eles. É como uma faca de dois gumes. Algo precioso como a família ou pessoas queridas? Poderia até ser isso... mas, para um homem, além de perseguir essas coisas, há algo mais precioso com o qual se deve lidar, algo mais importante para ele que para qualquer outro. Aquilo que ele quer conquistar para si mesmo, o seu sonho. Alguns sonham em conquistar o mundo. Outros dedicam suas vidas a promoverem suas “espadas”. Alguns sonhos são perseguidos por um único homem, que dedica sua vida inteira à isso. Outros sonhos são como uma tempestade, avassalando milhares de sonhos de outros homens. Os sonhos nos sustentam. Sofremos pelos sonhos, vivemos pelos sonhos e morremos pelos sonhos. Mesmo os abandonando, eles continuam chamuscando em algum lugar de nossos corações, provavelmente até o momento da nossa morte. Qualquer homem deseja uma vida assim para si. Como um fiel apóstolo de um Deus chamado ‘sonho’.”

(Kentaro Miura)

SUMÁRIO

1 RESUMO.....	1
2 ABSTRACT	2
3 INTRODUÇÃO	2
4 MATERIAL E MÉTODOS	4
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
6 CONCLUSÕES.....	12
7 REFERÊNCIAS	13

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE MAUÉS, AMAZONAS

JOÃO VICTOR GÓES BARBOSA¹; ARISTÓTELES DE JESUS TEIXEIRA FILHO¹

¹Universidade Federal do Amazonas-UFAM. Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia-ICET. Rua Nossa Senhora do Rosário, 3863 – Bairro Tiradentes, CEP: 69103-128, Itacoatiara, AM, Brasil. Joao_victor_goes96@hotmail.com; aristoteles@ufam.edu.br

1 RESUMO

A estimativa precisa da evapotranspiração de referência é essencial para o cálculo das necessidades de água de culturas agrícolas, programação de irrigação e gestão de recursos hídricos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo em relação ao método de Penman-Monteith-FAO, para a estimativa da evapotranspiração potencial de referência no município de Maués - AM, baseando-se em dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia, oriundos de estação automática, série 2009-2018. A partir das variáveis atmosféricas: precipitação pluviométrica, temperatura do bulbo seco, temperatura do bulbo úmido, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar global e insolação total diária foram feitas a estimativa da evapotranspiração de referência diária pelos métodos de Penman-Monteith, Blaney-Criddle, Hargreaves, Camargo e Jensen-Haise. Para comparar os métodos de estimativa de evapotranspiração de referência foram utilizados o erro-padrão de estimativa em relação ao método padrão, coeficiente de correlação, coeficiente de determinação, índice de concordância e coeficiente de desempenho. Dentre os resultados obtidos, verificou-se que todos os métodos avaliados superestimaram a evapotranspiração de referência em comparação com o método padrão, Penman-Monteith, em todos os meses do ano e, os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves e Jensen-Haise apresentaram desempenho “ótimo” enquanto Camargo apresentou desempenho “muito bom”. Os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo atenderam satisfatoriamente a estimativa da evapotranspiração de referência para Maués-AM, e podem ser utilizados em substituição ao método padrão Penman-Monteith FAO-56 quando não se disponibilizar de todas as variáveis para a estimativa da evapotranspiração de referência.

Palavras-chave: Irrigação, Camargo-Sentelhas, Penman-Monteith, Hargreaves.

**BARBOSA, J. V. G.; TEIXEIRA FILHO, A. de J.
PERFORMANCE EVALUATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION
ESTIMATION METHODS FOR THE CITY OF MAUÉS, AMAZONAS**

2 ABSTRACT

Accurate estimation of reference evapotranspiration is essential for calculating crop water requirements, irrigation scheduling and water resource management. In this sense, the objective of this work was to evaluate the performance of the Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise and Camargo methods in relation to the Penman-Monteith-FAO method, to estimate the reference potential evapotranspiration in the city of Maués - AM, based on data provided by the National Institute of Meteorology, from an automatic station, series 2009-2018. From the atmospheric variables: pluviometric precipitation, dry bulb temperature, wet bulb temperature, maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, wind speed, atmospheric pressure, global solar radiation and daily total insolation, the daily reference evapotranspiration was estimated by the methods of Penman-Monteith, Blaney-Criddle, Hargreaves, Camargo and Jensen-Haise. To compare the reference evapotranspiration estimation methods, the standard error of estimate was used in relation to the standard method, correlation coefficient, determination coefficient, agreement index and performance coefficient. Among the results obtained, it was found that all evaluated methods overestimated the reference evapotranspiration compared to the standard method, Penman-Monteith, in all months of the year, and the Blaney-Criddle, Hargreaves and Jensen-Haise methods showed performance "great" while Camargo presented a "very good" performance. The Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise and Camargo methods satisfactorily met the reference evapotranspiration estimate for Maués-AM, and can be used to replace the standard Penman-Monteith FAO-56 method when all variables are not available for the estimate of reference evapotranspiration.

Keywords: irrigation, Camargo-Sentelhas, Penman-Monteith, Hargreaves.

3 INTRODUÇÃO

Um dos requisitos essenciais para estimar a quantidade de água necessária para a produção agrícola é entender efetivamente as relações entre as condições climáticas e a evapotranspiração (ARAÚJO et al., 2007; CARVALHO et al., 2011)

A evapotranspiração é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. A evapotranspiração refere-se à transferência de água para a atmosfera, evaporada da superfície do solo e transpiração das plantas (SILVA JÚNIOR et al., 2017; QUEJ et al., 2019).

Há vários métodos de medir ou estimar a evapotranspiração, com métodos diretos e indiretos. Os principais métodos diretos são o gravimétrico e a lisimetria. Os principais métodos indiretos são as equações com dados meteorológicos e os evaporímetros (MENDONÇA e RASSINI, 2008).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é um método de estimativa da evapotranspiração a partir de dados meteorológicos e de equações desenvolvidas a partir de calibração com métodos diretos (MENDONÇA e RASSINI, 2008).

A ET_o, comumente aceita pelos pesquisadores, é a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com uma altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m⁻¹ e albedo de 0,23. Essa ET_o assemelha-se, bem de perto, a evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição de umidade (SEDIYAMA, 1996).

Vários fatores relacionados ao solo, à planta e ao clima são fundamentais na determinação da evapotranspiração, constituindo parâmetro agrometeorológico imprescindível na quantificação das necessidades hídricas das culturas e nos estudos sobre o aproveitamento dos recursos hídricos, tornando-se necessária a análise de métodos e modelos que melhor estimam essa variável (FERRAZ, 2008).

Parte dos modelos matemáticos são empíricos e não permitem estimativas razoáveis em áreas fora dos locais ou em locais diferentes daqueles para os quais eles foram calibrados (AYOADE, 2013).

Diversos estudos testando a precisão entre os métodos de estimativa da evapotranspiração têm sido realizados com a finalidade de apurar os modelos mais precisos para cada localidade (FERREIRA et al., 2020; CAPORUSSO e ROLIM, 2015; SANTOS et al., 2017; SILVA JÚNIOR et al., 2017; SOUZA e SOUSA, 2020), com os resultados desses estudos evidenciando que estas equações, podem ser usadas para estimativa de evapotranspiração em condições de limitações de dados, desde que validadas e calibradas levando em consideração as condições edafoclimáticas.

Nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, cujos climas variam de semiárido (Bs) a tropical (As, Aw e Af), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), os métodos mais frequentes e com os melhores ajustes foram: Blaney-Criddle FAO-24, Radiação Solar FAO-24 e Priestley-Taylor. Os ajustes satisfatórios obtidos pelo método de Blaney-Criddle, devem-se ao fato de que esse modelo foi desenvolvido em clima semiárido no oeste dos EUA, com características microclimáticas próximas ao Nordeste brasileiro (MUNHOZ et al., 2012).

Uma maneira frequentemente utilizada para verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração é por meio da comparação destes com o de Penman-Monteith, parametrizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO (TURCO et al., 2008). Já que dos diversos métodos existentes, a FAO decidiu utilizar como padrão o método de Penman-Monteith para a estimativa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

Devido à dificuldade de aquisição de dados necessários para o uso da equação de Penman-Monteith, uma vez que Ayoade (2013), afirma que a maior desvantagem do método de Penman é a exigência de muitos dados que não podem ser prontamente obtidos, particularmente nos países em desenvolvimento nos trópicos, lança-se a modelos com quantidades menores de variáveis, é o caso das equações de Blaney-Criddle, Hargreaves e Priestley-Taylor.

A atividade agrícola pode, também, ser afetada por alterações no regime hídrico. Isso inclui não somente variações em precipitação, mas também maiores taxas de evapotranspiração induzidas por temperaturas mais altas e, conseqüentemente, de deficiência hídrica (PBMC, 2014).

Informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (HENRIQUE e DANTAS, 2007).

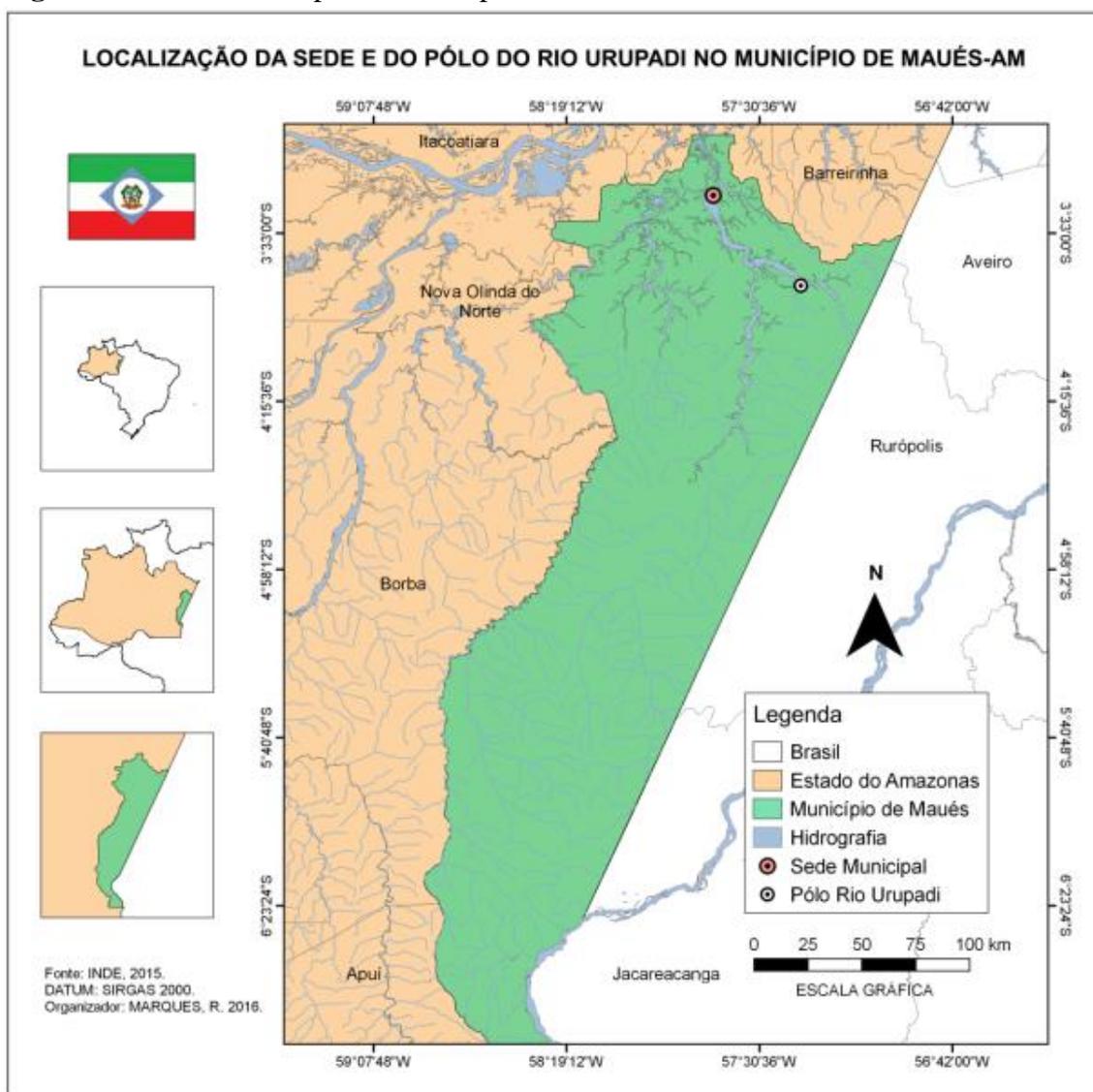
Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo em relação ao método de Penman-Monteith-FAO, para a estimativa da evapotranspiração potencial de referência no município de Maués - AM.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados nesta pesquisa, oriundos de estação automática, série histórica 2009-2018, foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), para a localidade de Maués, AM (OMM: 81734), latitude 03° 22' 54" Sul e longitude 57° 42' 55" Oeste, a 35 m de altitude.

De acordo com Köppen e Geiger a classificação do clima de Maués-AM (Figura 1), é do tipo tropical (Af), com uma pluviosidade significativa ao longo do ano, em torno de 2.100 mm e temperatura média anual de 27,2 °C (ALVARES et al., 2013).

Figura 1. Recorte do mapa do Município de Maués - AM.



Fonte: COSTA (2017).

As variáveis meteorológicas consideradas nesta pesquisa foram: precipitação pluviométrica; temperaturas do bulbo seco e úmido; temperaturas máxima e mínima do ar; umidade relativa; pressão atmosférica; insolação; radiação solar global; direção e velocidade

do vento. Essas variáveis são necessárias às estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) diária pelo método padrão, FAO - 56 Penman-Monteith (Equação 1), e pelos métodos avaliados, Blaney-Criddle (Equação 17), Hargreaves (Equação 18), Jensen-Haise (Equação 19) e Camargo (Equação 20). Os resultados mensais de ET_o dos métodos de Blaney-Criddle e Jensen-Haise foram divididos pelo número de dias de cada mês para obter-se ET_o diária. Os métodos 1, 2, 3, 4, e 5 seguem abaixo:

- Método 1: Penman-Monteith FAO-56:

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

Em que: ET_o = evapotranspiração potencial de referência (mm d⁻¹); Δ = declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹); Rn = radiação líquida total diária (MJ m⁻² d⁻¹); G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T = temperatura média diária do ar (°C); u₂ = velocidade média do vento medido a 2 metros de altura (m s⁻¹); e_s = pressão de saturação do vapor de água (kPa); e_a = pressão parcial do vapor de água (kPa).

A pressão exercida pelo teor saturante de vapor d'água (e_s), média diária, foi obtida em função da pressão de saturação da temperatura máxima e mínima, descrita pela equação de Tetens, a partir das equações (2) e (3):

$$e_s = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_n)}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$e^0 = 0,6108 * e^{\left(\frac{17,27*T}{237,3+T} \right)} \quad (\text{Equação 3})$$

A pressão de vapor atual (e_a) foi obtida conforme Allen et al. (1998), onde a temperatura mínima (T_n) do ar diária será subtraída de 2 °C para aproximar ao máximo possível da temperatura do ponto de orvalho (T_d), descrita pela equação 4:

$$e_a = e_s(T_d) = 0,6108 * e^{\left(\frac{17,27*T_d}{237,5+T_d} \right)} \quad (\text{Equação 4})$$

A declividade de curva de pressão de vapor foi calculada a partir da equação 5, como segue:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 * e^{\left(\frac{17,27*T_d}{237,3+T_d} \right)} \right]}{(T_m + 237,3)^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Já a constante psicrométrica foi estimada a partir das equações (6) e (7):

$$\gamma = \frac{C_p * p}{\epsilon * \lambda} = 0,665 * 10^{-3} \quad (\text{Equação 6})$$

$$p = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 * Z}{293} \right)^{5,26} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: C_p = Calor específico a pressão constante, $1,013 \times 10^{-3}$, $\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; P = Pressão atmosférica, kPa; ε = Coeficiente de peso molecular de vapor de água ar seco-1, 0,622; λ = Calor latente de vaporização, $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$; Z = Altitude do local, m.

Sabe-se que o fluxo de calor no solo (G) para o período de um dia ou dez dias sob uma superfície de referência gramada é relativamente pequena, o fluxo de calor no solo pode ser ignorado ($G \approx 0$). Para o período mensal G foi estimado pela equação 8:

$$G_{mês,i} = 0,14 (T_{mês,i} - T_{mês,i-1}) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: $T_{mês,i}$ = Temperatura média mensal do ar para o mês i , $^\circ\text{C}$; $T_{mês,i-1}$ = Temperatura média mensal do mês anterior a i , $^\circ\text{C}$

Já o saldo de radiação (R_n) é a diferença entre o saldo de radiação de onda curta (R_{ns}) e o saldo de radiação de onda longa (R_{nl}), que foi estimado de acordo com as equações (9) a (16):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Equação 9})$$

$$R_{ns} = (1 - 0,23) * R_s \quad (\text{Equação 10})$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{x,k}^4 + T_{n,k}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (\text{Equação 11})$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} * Z) R_a \quad (\text{Equação 12})$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta + \cos \varphi \cos \delta \text{ sen } \omega_s) \quad (\text{Equação 13})$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (\text{Equação 14})$$

$$\delta = 0,409 \text{ sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,35 \right) \quad (\text{Equação 15})$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (\text{Equação 16})$$

Em que: R_s = Radiação solar global em, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; R_a = Radiação no topo da atmosfera, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; G_{sc} = Constante, $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; σ = Constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; R_{so} = Radiação solar em um dia sem nuvens, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; Z = Altitude do local, m; d_r = Distância relativa Terra-Sol; J = Dia Juliano; δ = Declinação solar, radianos; φ = Latitude local, radianos; ω_s = Ângulo de radiação no momento do por do sol, radianos; $T_{x,k}$ = Temperatura máxima observada durante o período de 24 horas, K; $T_{n,k}$ = Temperatura mínima observada durante o período de 24 horas, K.

- Método 2: Blaney e Criddle (1950):

$$ET_o = [(0,457 * T + 8,13) * p] * c \quad (\text{Equação 17})$$

Em que: ETo = evapotranspiração potencial de referência (mm mês⁻¹); c = coeficiente regional de ajuste da equação (BERNARDO et al., 2006); T = temperatura média mensal do ar (°C); P = percentagem mensal das horas anuais de luz solar (BERNARDO et al., 2006).

- Método 3: Hargreaves e Samani (1985):

$$ET_o = 0,0135 * KT * (T + 17,8) * R_a * 0,408 * (T_x - T_n)^{1/2} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que: ETo = evapotranspiração potencial de referência (mm d⁻¹); T = temperatura média diária do ar (°C); T_x = temperatura máxima diária (°C); T_n = temperatura mínima diária (°C); R_a = radiação no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹); KT = 0,162, para uma região interiorana; e KT igual a 0,19, para uma região costeira.

- Método 4: Jensen-Haise (1963):

$$ET_o = R_s(0,0252 * T_m + 0,078) \quad (\text{Equação 19})$$

Em que: ETo = evapotranspiração potencial de referência (mm mês⁻¹); R_s = radiação solar global (mm d⁻¹); T_m = temperatura média mensal (°C).

- Método 5: Camargo (1971):

$$ET_o = R_T * T * k_f * ND \quad (\text{Equação 20})$$

Em que: ETo = evapotranspiração de referência (mm d⁻¹); R_T = radiação solar extraterrestre (mm d⁻¹ de evapotranspiração equivalente); ND = número de dias do período analisado; T = temperatura do ar média (°C); K_f = fator de ajuste que varia com a temperatura do ar média anual do local (k_f = 0,01 para T < 23 °C; k_f = 0,0105, para T = 24 °C; k_f = 0,011, para T = 25 °C; k_f = 0,0115, para T = 26 °C; e k_f = 0,012, para T > 26°C).

Os valores estimados de ETo em planilha eletrônica no Excel, foram analisados por regressão linear (Equação 21), tendo como variável dependente (Y), os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo e como variável independente (X), os valores de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO 56.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (\text{Equação 21})$$

Em que: Y = valor estimado para os métodos empíricos; β₀ = coeficiente angular; β₁ = coeficiente linear; X = valor estimado pelo método padrão Penman-Monteith-FAO 56.

A correlação entre o método de Penman-Monteith-FAO 56 e os métodos empíricos, foi realizada com base em indicadores estatísticos, a fim de se observar a precisão dada pelo coeficiente de correlação (r) que está associado ao desvio entre os valores estimados e medidos, indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, utilizando-se a equação 22.

$$r = \sqrt{\frac{[\sum(Y_e - \bar{Y})(Y - \bar{Y})]^2}{\sum(Y_e - \bar{Y})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Equação 22})$$

Em que: Y_e = valor de ETo estimado pelo método avaliado; Y = valor estimado pelo método Penman-Monteith-FAO 56; \bar{Y} = média dos valores do método padrão.

A exatidão na estimativa da ETo em relação ao modelo padrão, foi obtida através do índice “d” que varia 0 a 1 (WILLMOTT et al., 1985) (Equação 23).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Y_e - \bar{Y})^2}{\sum(|Y_e - \bar{Y}| + |Y - \bar{Y}|)} \right] \quad (\text{Equação 23})$$

O coeficiente de segurança ou desempenho “c” (Tabela 1), foi calculado pelo produto de r e d ($c = r \cdot d$) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Tabela 1. Valores do coeficiente de desempenho conforme 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
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Os métodos mais adequados para estimativa da ETo, baseou-se nos menores valores de EPE. A quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas foi obtida pelo erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 24) e através da relação dos valores médios, expressa em porcentagem (%) (Equação 25).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(Y_e - \bar{Y})^2}{n}} \quad (\text{Equação 24})$$

$$\% = \frac{Y_e}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 25})$$

Em que: Y_e = média do método estimado; Y = média do método padrão; n = número de observações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante um período de 10 anos (2009 a 2018), observa-se que as temperaturas mínima ($T_{mín}$), máxima ($T_{máx}$) e média do ar (T) variaram de 22,59 °C a 23,53 °C; 30,13 °C a 34,09 °C e 25,37 °C a 27,44 °C, respectivamente (Tabela 2). Constata-se que a menor amplitude foi observada nas mínimas, com valor de 0,94°C. Segundo Araújo et al. (2012), essa baixa amplitude das $T_{mín}$, são características de regiões de baixa latitude e altitude, como acontece com Maués, AM. Observa-se também que os dados de umidade relativa média do ar, mantiveram-se sempre acima de 82,52%, mesmo nos meses com menor quantidade de chuva.

Tabela 2. Média mensal de temperatura mínima, máxima e média, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar global e insolação do município de Maués – AM, 2009 – 2018.

Meses	Tmín (°C)	Tmáx (°C)	T (°C)	UR (%)	u ₂ (m s ⁻¹)	Rs (MJ m ⁻²)	n (h)
Jan	23,05	30,36	25,57	89,46	0,40	13,01	4,75
Fev	23,10	30,13	25,37	90,75	0,37	12,85	4,06
Mar	23,31	30,24	25,59	90,84	0,36	12,57	3,68
Abr	23,53	30,68	25,95	90,53	0,37	12,90	4,41
Mai	23,45	31,21	26,08	89,62	0,36	13,12	5,13
Jun	22,93	31,95	26,19	87,59	0,35	14,80	6,83
Jul	22,59	32,25	26,23	85,92	0,36	15,25	7,53
Ago	22,81	33,68	26,95	83,68	0,38	16,61	8,34
Set	23,14	34,06	27,38	82,52	0,41	17,36	8,13
Out	23,24	34,09	27,44	82,62	0,43	16,49	7,18
Nov	23,22	33,02	26,87	85,05	0,39	15,23	5,98
Dez	23,08	31,30	26,04	88,66	0,36	12,87	5,03

Com os dados de velocidade de vento (Tabela 2), observou-se que a velocidade não alcançou em nenhum mês $1,0 \text{ m s}^{-1}$, sendo sua velocidade máxima registrada em outubro com $0,43 \text{ m s}^{-1}$ e a mínima em junho com $0,35 \text{ m s}^{-1}$, mantendo-se praticamente constante durante o ano todo.

Na Tabela 3 são apresentadas as médias da ETo para o município de Maués, AM, obtidas pelos métodos avaliados, onde observa-se que os mesmos superestimaram a ETo durante todos os meses do ano, com a diferença entre os valores médios de ETo variando de $0,72 \text{ mm dia}^{-1}$ pelo método de Blaney-Criddle (EToB-C) a $1,45 \text{ mm dia}^{-1}$ pelo método de Camargo (EToC).

Tabela 3. Médias da evapotranspiração de referência (ETo) estimadas pelos métodos de Blaney-Criddle (EToB-C), Camargo (EToC), Hargreaves (EToH), Jensen-Haise (EToJ-H) e Penman-Monteith (EToP-M) para Maués, AM.

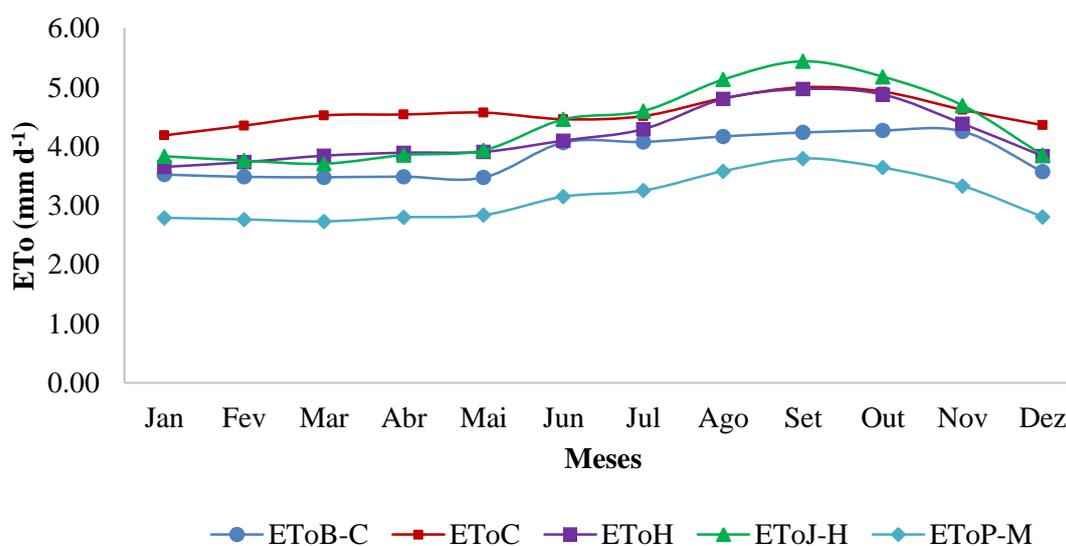
MESES	EToB-C	EToC	EToH	EToJ-H	EToP-M
	mm d ⁻¹				
Jan	3,52	4,18	3,65	3,83	2,79
Fev	3,48	4,35	3,73	3,76	2,76
Mar	3,48	4,52	3,84	3,70	2,73
Abr	3,49	4,54	3,89	3,85	2,80
Mai	3,47	4,57	3,91	3,93	2,84
Jun	4,06	4,46	4,10	4,45	3,15
Jul	4,07	4,51	4,29	4,60	3,25
Ago	4,17	4,81	4,80	5,13	3,58
Set	4,23	5,00	4,97	5,44	3,79
Out	4,27	4,92	4,87	5,18	3,64
Nov	4,25	4,62	4,38	4,69	3,33
Dez	3,57	4,36	3,84	3,85	2,81

Média	3,84	4,57	4,19	4,37	3,12
ME-PM*	0,72	1,45	1,07	1,25	–

*ME-PM – Diferença entre as médias da evapotranspiração de referência dos métodos empíricos com a média do método padrão da FAO-56.

Entre os métodos avaliados, EToB-C (Figura 2) foi o que menos superestimou a ETo durante todos os meses do ano. O método de EToC foi o que mais superestimou durante os meses de dezembro a junho, enquanto nos meses de julho a novembro foi o método de Jensen-Haise (EToJ-H). Segundo Pereira et al. (1997), os métodos de EToB-C e EToJ-H foram desenvolvidos em regiões semiáridas americanas, o que justifica esses modelos apresentarem uma maior elevação da ETo durante os meses com menor precipitação pluviométrica em comparação aos meses com maior precipitação pluviométrica na região de Maués (AM). O método de EToC é baseado nos resultados da equação de Thornthwaite, que segundo Pereira et al. (1997), não é adequado para regiões de oásis, resultando em subestimação, o que pressupõe que para regiões com clima quente e úmido como o município de Maués (AM), ocorre uma superestimação, como observado nos resultados.

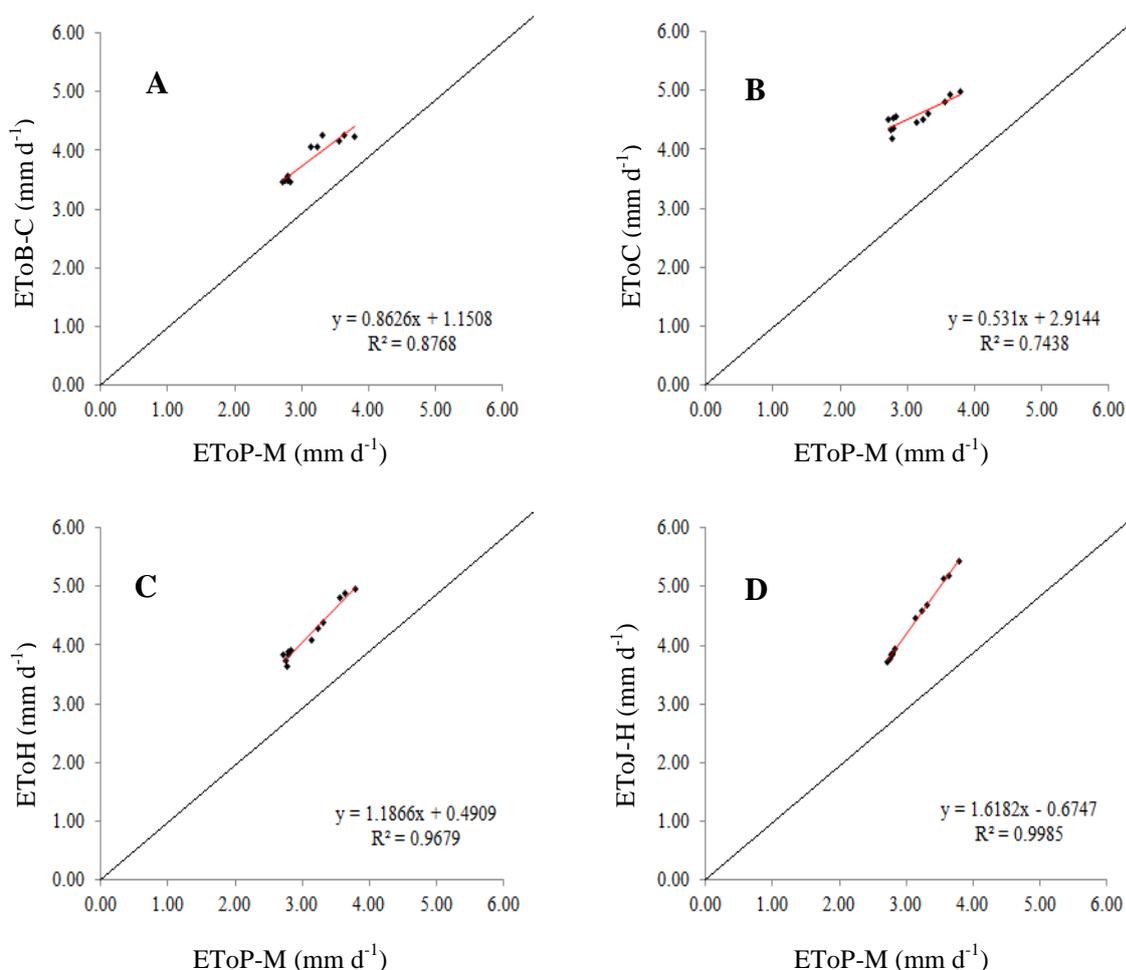
Figura 2. Valores médios de ETo (mm d^{-1}) estimados pelos métodos: Blaney-Cridde (EToB-C), Camargo (EToC), Hargreaves (EToH), Jensen-Haise (EToJ-H) e Penman-Monteith (EToP-M) para o município de Maués-AM.



Visualizam-se na Figura 3 a análise de regressão linear entre os métodos avaliados e o método padrão com suas respectivas equações de ajuste e coeficiente de determinação (r^2). Aos Gráficos foi adicionada uma linha ao meio a fim de auxiliar a verificação de quando um método sub ou superestima o método padrão.

Em relação ao resultado obtido pelo método de Hargreaves (EToH) que superestimou a ETo, Oliveira (2016) afirma que apesar da facilidade de uso, este método tende a superestimar o valor de ETo em climas úmidos, sendo necessária uma calibração regional para o ajuste de sua precisão. No presente trabalho, não foi realizada calibração dos métodos avaliados.

Figura 3. Regressão linear entre os valores de ETo estimados pelos métodos de Blaney-Criddle (A), Camargo (B), Hargreaves (C) e Jensen-Haise (D), com o método padrão, Penman-Monteith, Maués-AM.



Na Tabela 4, apresentam-se as porcentagens de variação da ETo em relação ao método padrão (%), o erro-padrão de estimativa (EPE), o coeficiente de correlação (r), o coeficiente de determinação (r²), o índice de concordância (d), o coeficiente de desempenho (c) e a classificação baseada no coeficiente de desempenho.

Tabela 4. Percentagem em relação ao método-padrão (%); erro-padrão de estimativa (EPE); coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (r²), índice de concordância (d), coeficiente de desempenho (c) e classificação baseada no coeficiente de desempenho para a cidade de Maués-AM.

Método	%	EPE (mm d ⁻¹)	r	r ²	d	c	Classificação de Desempenho
EToB-C	22,94	0,22	0,94	0,88	0,99	0,92	Ótimo

EToC	46,35	0,44	0,86	0,74	0,96	0,83	Muito Bom
EToH	34,15	0,32	0,98	0,97	0,98	0,96	Ótimo
EToJ-H	39,89	0,38	1,00	1,00	0,97	0,97	Ótimo

Baseando-se no erro-padrão de estimativa (EPE), constata-se que o método de EToB-C estima melhor a ETo do que os demais. Verifica-se que os valores de EPE apresentaram uma variação de $0,22 \text{ mm d}^{-1}$ a $0,44 \text{ mm d}^{-1}$, com o menor valor sendo obtido pelo método de EToB-C e o maior valor pelo método de EToC. Nota-se que o método de EToC, foi o que apresentou os dados mais dispersos $r^2 = 0,74$, enquanto o método EToJ-H foi o que apresentou os dados menos dispersos $r^2 = 1,00$, evidenciando que os ajustes das equações a partir do método padrão-EToP-M, foram satisfatórios.

Os métodos de EToB-C, de EToH e de EToJ-H apresentaram os melhores ajustes, tendo seus desempenhos classificados como “ótimo” seguido pelo método de EToC que teve desempenho “muito bom”. Segundo Ferreira et al. (2020), os métodos de EToB-C e EToC apresentam provavelmente melhores desempenhos por serem mais sensíveis a regiões de clima úmido, clima este característico do estado do Amazonas.

Os métodos de EToJ-H e de EToH mesmo sendo desenvolvidos para regiões áridas e semiáridas apresentaram desempenho satisfatório, podendo estes serem utilizados para o local de estudo.

Araújo et al. (2012), ao comparar vários métodos para o município de Rio Branco (AC) classificaram o método de EToC como “ruim” diferente do encontrado neste trabalho. Souza e Sousa (2020) para Rio Branco (AC) obtiveram classificação mau pelo o método de EToH.

Back (2008) em estudo de comparações entre o método de EToB-C com método de EToP-M na cidade de Urussanga-SC classificou como péssimo. Ferraz (2008) para Rio Branco (AC) obteve classificação péssimo para o método de EToJ-H.

Os métodos de Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Hargreaves e Camargo apresentam grande praticidade, pois requerem somente dados de temperatura do ar e algumas informações médias do clima. Os estudos citados reforçam a necessidade de se buscar o método mais adequado para determinada região para ter-se mais precisão nos resultados da evapotranspiração quando utilizados para fins de se desenvolver projetos de irrigação nas propriedades.

6 CONCLUSÕES

Os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo atenderam satisfatoriamente a estimativa da ETo para Maués-AM, podendo serem utilizados em substituição ao método padrão Penman-Monteith FAO-56 quando não se disponibilizar de todas as variáveis para a estimativa da ETo.

O método de Jensen-Haise foi o que mostrou valores mais precisos, apresentando índice de desempenho ótimo enquanto o método de Camargo obteve o pior desempenho, classificado como muito bom.

Os métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves, Jensen-Haise e Camargo superestimaram os valores de ETo em todos os meses do ano.

Balanco hídrico e calibração dos métodos avaliados são alguns dos trabalhos futuros nesta vertente que podem ser feitos para região de Maués.

7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspirationGuidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56. Acesso em: 04 jun. 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift v. 22, n. 6, p. 711-728 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ARAÚJO, W. F.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; VENANCIO, J. B. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 18-22, 2012. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/926821>
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para trópicos**. 17^a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2013. 350p. ISBN 978-85-286-0427-6.
- 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. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n4p449-466>
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- 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.
- CARVALHO, R. L. S.; DELGADO, A. R. S. Estimativas da evapotranspiração de referência do município de Ariquemes (RO) utilizando os métodos Penman-Monteith-FAO e Hargreaves-Samani. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 6, p. 1038-1048, 2016. DOI: 10.7127/rbai.v10n600497
- CARVALHO, L. G. D.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/12760>. Acesso em: 11 jun. 2021
- CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. D. S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 1, p 1-9, 2015. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i1.18277>

COSTA, L. F. B. **Cultivadores de guaraná: um estudo do processo de monopolização do território pelo capital no município de Maués – AM.** 2017. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas-UFAM, Manaus, 2017.

FERRAZ, P. de A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para região do Rio Branco – Acre.** 2008. 85 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza da Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2008.

FERREIRA, J. C. C.; TEIXEIRA FILHO, A. de J.; BARBOSA, J. V. G.; ARRUDA, D. A.: Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no município de Parintins, AM. In:____.; SALES, F. O. (Organizador). **Ciências Exatas e da Terra: Aprendizado, Integração e Necessidades do País.** Ponta Grossa, Pr: Atena, 2020.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, p. 96-99, 1985.

HENRIQUE, F. A. N.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n.6, p. 594–599, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600007>

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados do monitoramento da estação automática de Maués/AM.** Comunicação pessoal via email: Cristina.costa@inmet.gov.br em 13 de ago. 2019.

MENDONÇA, F. C.; RASSINI, J. B. Manejo de irrigação da alfafa. In: FERREIRA, R. P. et al. (Eds.) **Cultivo e utilização da alfafa nos trópicos.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008. p.207-226.

MUNHOZ, J. S. B.; OLIVEIRA S. F.; MARIN, F.; BATTISTI, R. Estimativa da evapotranspiração de referência no Brasil: uma análise crítica. In CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, Gramado. **Anais...** Gramado: UFRGS, 2012. (CD-ROM).

OLIVEIRA, A. L. M. **Calibração da equação de Hargreaves-Samani e de um novo método para estimativa da evapotranspiração de referência na região mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.** 2016. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del Rei – Campus Sete Lagoas, Sete Lagoas, 2016.

PBMC, 2014. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A. R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp.

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

QUEJ, V. H.; ALMOROX, J.; ARNALDO, J. A.; MORATIEL, R. Evaluation of temperature-based methods for the estimation of reference evapotranspiration in the Yucatán peninsula, Mexico. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 2, 2019.

SANTOS, R. D. S.; SOUZA, M. H. C.; BISPO, R. de C.; VENTURA, K. M.; BASSOI, L. H. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Petrolina, PE. **Irriga**, Botucatu, v.1, n. 1, p. 31-39, 2017. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p31-39>

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

SILVA JÚNIOR, R. O.; SOUZA, E. B.; TAVARES, A. L.; MOTA, J. A.; FERREIRA, D.; SOUZA-FILHO, P. W.; e ROCHA, E. J. D. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.89 n.3, p. 1985-2002, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170147>

SOUZA, M. L. A. de; 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. <http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat>

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medida na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.1, p. 63-80, 2008. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n1p63-80>

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J.; KLINK, K.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, A.; ROWE, C. L. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>