

Métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração em clima tropical equatorial
Empirical methods of evapotranspiration estimation in equatorial tropical climate
Métodos empíricos de estimación de la evapotranspiración en el clima tropical
ecuatorial

Recebido: 17/09/2020 | Revisado: 19/09/2020 | Aceito: 30/09/2020 | Publicado: 01/10/2020

Jefferson Vieira José

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1384-0888>

Universidade Federal do Acre, Brasil

E-mail: jfvieira@hotmail.com.br

Lívia Braz Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0915-8501>

Universidade Federal do Acre, Brasil

E-mail: lbraz6368@gmail.com

Hugo Motta Ferreira Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7524-0127>

Universidade Federal do Acre, Brasil

E-mail: hugo.ufac@gmail.com

Lucas da Costa Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3054-395X>

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil

E-mail: lucas.santos@ufvjm.edu.br

Timóteo Herculino da Silva Barros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1242-9889>

Universidade de São Paulo, Brasil

E-mail: timoteo@usp.br

Kelly Nascimento Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-9745>

Universidade Federal do Acre, Brasil

E-mail: kellyleite14@hotmail.com

Resumo

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma variável muito importante, uma vez que é usada no planejamento e manejo dos sistemas de irrigação e demais áreas. Sendo assim, sua determinação deve ser feita cuidadosa e rigorosamente em face aos vários métodos de estimativa existentes. Neste sentido, dado que o método padrão de Penman-Monteith FAO/56 exige muitos elementos meteorológicos de entrada, o estudo de métodos alternativos se mostra necessário pelas inúmeras delimitações existentes nas estações automáticas de diversas regiões. O presente estudo objetivou comparar a evapotranspiração obtida a partir do método padrão Penman-Monteith FAO/56 com as determinadas por equações empíricas, buscando, identificar métodos mais simples e, portanto, alternativos ao método de referência na Bacia Hidrográfica do Alto Juruá. Para o estudo foram utilizadas três estações automáticas localizadas em Cruzeiro do Sul, Porto Walter e Marechal Thaumaturgo no Acre, com dados pertencentes ao INMET e Xavier, King e Scanlon. Os resultados mostraram que os métodos de Pennan Original e Kimberly Penman foram os que melhor estimaram a ET_o em relação ao modelo padrão para as três estações automáticas, enquanto que os métodos de Blaney-Criddle e Hargreaves-Samani apresentaram desempenho inferior. Os métodos de Priestley-Taylor e Kimberly Penman foram escolhidos como alternativos aos métodos de Pennan Original e Kimberly Penman.

Palavras-chave: Penman-monteith; Diagrama de Taylor; Acre.

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_o) is an especially important variable since it is used in the planning and management of irrigation systems and other areas. Therefore, its determination must be made carefully and rigorously in the face of the various existing estimation methods. In this sense, given that the standard Penman-Monteith FAO/56 method requires many meteorological input elements, the study of alternative methods is quite necessary for a view of the numerous delimitations existing in automatic stations in several different regions. The present study aimed to identify, among the methods of Pennan Original, Modified Penman, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, and Kimberly Penman, the most alternative methods to the standard model, through statistical analysis of the data, considering the climatic seasons (Summer, Autumn, Winter, and Spring), from three automatic stations located in Cruzeiro do Sul, Porto Walter and Marechal Thaumaturgo in Acre state, Brazil with data belonging to INMET and Xavier, King and Scanlon. It was concluded that the methods of Pennan Original and Kimberly Penman were the ones that best estimated ET_o concerning

the standard model for the three automatic stations, while the methods of Blaney-Criddle and Hargreaves-Samani presented the worst performance. The Priestley-Taylor method were chosen as alternative to the methods of Pennan Original.

Keyword: Penman-monteith; Taylor diagram; Acre.

Resumen

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es una variable especialmente importante ya que se utiliza en la planificación y gestión de sistemas de riego y otras áreas. Por tanto, su determinación debe realizarse con cuidado y rigor ante los distintos métodos de estimación existentes. En este sentido, dado que el método estándar Penman-Monteith FAO / 56 requiere muchos elementos de entrada meteorológicos, el estudio de métodos alternativos es bastante necesario para ver las numerosas delimitaciones que existen en las estaciones automáticas en varias regiones diferentes. El presente estudio tuvo como objetivo identificar, entre los métodos de Pennan Original, Modified Penman, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor y Kimberly Penman, los métodos más alternativos al modelo estándar, mediante el análisis estadístico de los datos, considerando las estaciones climáticas (Verano, Otoño, Invierno y Primavera), de tres estaciones automáticas ubicadas en Cruzeiro do Sul, Porto Walter y Marechal Thaumaturgo en el estado de Acre, Brasil con datos de INMET y Xavier, King y Scanlon. Se concluyó que los métodos de Pennan Original y Kimberly Penman fueron los que mejor estimaron la ET_o con respecto al modelo estándar para las tres estaciones automáticas, mientras que los métodos de Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani presentaron el peor desempeño. Se eligió el método de Priestley-Taylor como alternativa a los métodos de Pennan Original.

Palabra clave: Penman-monteith; Diagrama de Taylor; Acre.

1. Introdução

A evapotranspiração (ET) é definida genericamente como sendo a perda combinada da evaporação da água presente nas superfícies do solo e das plantas e da transpiração do dossel vegetativo. Seu conhecimento é de grande importância em muitas áreas, sobretudo naquelas que envolvem estudos hidrológicos e climatológicos, além de incluir em sua gama de aplicabilidade o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação (Sentelhas et al., 2010). Nas últimas décadas vários têm sido os métodos desenvolvidos e aprimorados para estimar a ET (Penman, 1948; Blaney e Criddle, 1950; Makkink, 1957; Turc, 1961; Priestley e Taylor,

1972; Hargreaves e Samani, 1985; Oudin et al., 2005), tendo sido levantados por Lu et al. (2005) mais de 50 equações, as quais envolvem os mais diversos tipos de formulações. Métodos esses originados de correlações entre ET medidas em lisímetros e com variáveis do clima local (Pereira, Sedyama e Villa Nova, 2013).

No entanto, apesar da diversidade de metodologias utilizadas para este fim, o único método reconhecido como padrão utilizado principalmente na agricultura por cientistas e, inclusive pela Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), é o modelo de Penman-Monteith FAO/56 (PM56).

A despeito da robustez do modelo PM56, a qual é conferida pela abordagem termo-aerodinâmica utilizada em seu desenvolvimento, este possui o inconveniente de necessitar de dados meteorológicos muitas vezes indisponíveis (Almorox et al., 2018). Especificamente, em regiões remotas, os conjuntos de dados meteorológicos disponíveis são imprecisos e esparsos, especialmente no que diz respeito à radiação global ou horas de sol, pressão do vapor de água ou umidade relativa e velocidade do vento (Almorox et al., 2015).

De acordo com Allen et al. (2011) os erros comuns dos sistemas de medição e sublinham a importância de coletar e usar dados de boa qualidade para a estimativa de ET, abordando também a importância do tipo de cenário e das condições de aquisição das medições climáticas. Os autores também afirmam que em climas úmidos e semiúmidos a evapotranspiração é dominada mais pela disponibilidade líquida de radiação do que pela aerodinâmica e déficit de vapor em comparação com climas áridos. Fernandes et al. (2011) observaram a diferenciação na estimativa de evapotranspiração com o evaporímetro de piche nas estações do ano, fato que se deve aos valores da umidade relativa do ar disponíveis.

As preferências na região da Amazônia oriental têm sido frequentemente direcionadas para o método de Hargreaves-Samani, no estudo de risco climáticos do café (Sousa e Oliveira, 2018). O método de Turc (Souza e Sousa, 2020) e o método de Pennan original (Souza et al., 2011) em relação ao PM56, nas estações climáticas de Cruzeiro do Sul e Rio Branco, respectivamente. Delgado, Almeida e Souza (2017) recomendaram calibrar os métodos de Irmak et al. (2003) e Valiantzas (2013) provenientes de dados de sensoriamento remoto na estimativa da ET no estado do Acre.

Dessa forma, são necessárias abordagens alternativas que suportem dados climáticos limitados, o que tem levado a uma grande quantidade de estudos relacionados aplicados a várias condições climáticas (Pereira, Sedyama e Villa Nova, 2013) a fim de melhorar as estimativas da ET.

A comparação da evapotranspiração obtida a partir do método padrão PM56 com as determinadas por equações empíricas, busca, identificar métodos mais simples e, portanto, alternativos ao método de referência individualmente para cada estação meteorológica, no qual pode ser diferenciado por estação do ano (verão, outono, inverno e primavera).

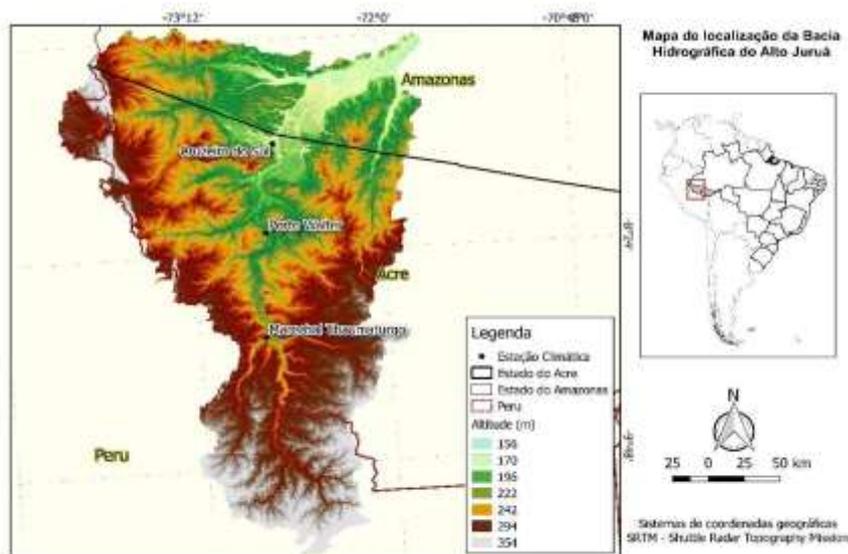
Diante do exposto o presente estudo objetivou comparar a evapotranspiração obtida a partir do método padrão PM56 com as determinadas por equações empíricas, buscando, identificar métodos mais simples e, portanto, alternativos ao método de referência na Bacia Hidrográfica do Alto Juruá.

2. Metodologia

As pesquisas visam trazer novos saberes para a sociedade como preconizam Pereira et al. (2018). O trabalho foi estudo de caso caracterizado como descritivo quantitativo de acordo com os métodos citados por Naghettini e Pinto (2007) de estudo de probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial.

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Alto Juruá que está localizada no Norte do Brasil, cobrindo os Estados do Acre e Amazonas e com a nascente na República do Peru situada entre as latitudes de 70 e 74°W e as longitudes de 7 e 10°S. A região possui tipologia climática tipo Af (Köppen-Geiger), caracterizada por clima tropical equatorial, sem estação seca (Alvares et al., 2013). Na Figura 1 são apresentadas as estações meteorológicas que compõem a bacia hidrográfica do Alto Juruá bem como suas respectivas localizações geográficas na região estudada.

Figura 1. Localização das estações meteorológicas na bacia hidrográfica do Alto Juruá



Fonte: Autores.

Em acordo com a Figura 1, como locais representativos da área de estudo, consideramos três estações meteorológicas automáticas localizadas no Estado do Acre, sendo elas: Cruzeiro do Sul, Porto Walter e Marechal Thaumaturgo, com período de estudo abrangendo o período de 2017 a 2019. As coordenadas geográficas das referidas estações podem ser verificadas na Tabela 1, assim como suas respectivas altitudes em metros, período de anos avaliados de cada estação e os seus códigos na Organização Mundial de Meteorologia.

Tabela 1. Localização, altitude e período de observação dos dados meteorológicos coletados em estações automáticas na Bacia Hidrográfica do Alto Juruá, Acre, Brasil.

Estações	OMM	Altitude	Lat.	Long.	INMET	Xavier
		metros			Período (anos)	
Cruzeiro do Sul	81881	220	-7.61°	-72.68°	2017 - 2019	
Marechal. Thaumaturgo	81922	221	-8.95°	-72.79°	2017 - 2019	1980 – 2013
Porto Walter	81921	205	-8.27°	-72.75°	2017 - 2019	

OMM (Código da estação na Organização Mundial de Meteorologia); INMET (do Instituto Nacional de Meteorologia); Xavier (Banco de dados de Xavier, King e Scanlon, 2016); Lat. (Latitude); Long. Longitude. Obs: para os anos de 2014, 2015 e 2016 não há dados meteorológicos registrados.

Fonte: Xavier, King e Scanlon (2016); INMET (do Instituto Nacional de Meteorologia).

Dados meteorológicos

Para a estimativa da evapotranspiração de referência foram considerados dados meteorológicos de temperatura do ar (máxima, mínima e média), umidade relativa do ar (média), radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica, que foram obtidos a partir da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/>). As falhas identificadas na série histórica foram preenchidas a partir do banco de dados meteorológicos desenvolvido por Xavier, King e Scanlon (2016), a partir de técnicas de interpolação.

Os métodos de ETo de Pennan Original (Pen48), Penman Modificado (Pen24), Blaney-Criddle (BC24), Hargreaves-Samani (Harg), Priestley-Taylor (Tylr) e Kimberly Penman. (KPen1) foram utilizados para comparar suas estimativas da ETo com o método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 (PM56), todos eles avaliados na escala diária. Na Tabela 2 são apresentadas as formulações dos métodos de estimativa de ETo. A Tabela 2 contém os métodos de estimativa de ETo avaliados, bem como suas respectivas siglas, elementos meteorológicos e referências.

Tabela 2. Métodos utilizados e seus respectivos modelos matemáticos.

Método	Sigla	Elementos meteorológicos	Referência
Pennan Original	Pen48	Tx, Tn, T, UR,v, n, P, Rs, Rn; DJ; Lat	(Penman, 1948)
Penman Modificado	Pen24	Tx, Tn, T, UR,v, n, P, Rs, Rn; DJ; Lat	(Doorenbos; Pruitt, 1977)
Blaney-Criddle	BC24	Tm, URmín, n, v; DJ, Lat	(Doorenbos; Pruitt, 1977)
Hargreaves-Samani	Harg	T, Tx, Tn; DJ, Lat	(Hargreaves; Samani, 1985)
Priestley-Taylor	Tylr	T, P, Rn, G; DJ, Lat	(Priestley; Taylor, 1972)
Kimberly Penman	KPen1	Tx, Tn, T, UR,v, Rn, DJ; Lat	(Wright; Jensen, 1972)
Penman-Monteith	PM56	Tx, Tn, T, UR,v, n, P, Rs, Rn; DJ; Lat	(Allen et al., 1998)

Tx, Tn e T: temperaturas diárias máxima, mínima e média, respectivamente; UR: umidade relativa média diária; v: velocidade do vento; n: insolação ou horas de brilho solar; P: pressão atmosférica média diária; Rs: radiação solar; Rn: saldo de radiação no sistema solo-planta-atmosfera; Tm: temperatura média mensal observada no mês em estudo; G: fluxo de calor no solo; DJ (dia Juliano) e Lat (latitude).

Fonte: Autores.

Análise dos dados

A análise dos dados foi feita com valores diários de ETo, em mm dia⁻¹, por meio da análise de regressão e gráficos lineares simples. A verificação da acurácia foi realizada com o Diagrama de Taylor (Pereira et al., 2014), com base no desvio-padrão, coeficiente de correlação (R²) e a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças (REQM).

Foi utilizado o software livre R Statistical® (R Core Team, 2020) e os seus pacotes. Na elaboração do banco de dados provenientes do INMET foram utilizados os pacotes tidyquant – *Tidy Quantitative Financial Analysis* e tidyr – *Tidy Messy Data*. O banco de dados de Xavier, King e Scanlon (2016) foram extraídos com os pacotes raster – *Geographic Data Analysis and Modeling* e ncdf4 – *Interface to Unidata netCDF*. Os testes estatísticos de comparação entre os modelos de ETo foi por meio do pacote hydroGOF – *Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series*, Plotrix - *a package in the red light district of R* e ggridges – *Ridgeline Plots in 'ggplot2*. Os gráficos foram realizados com os pacotes ggplot2 – *Elegant Graphics for Data Analysis* e gridExtra – *Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics*. As estimativas dos oito modelos de ETo foram feitas por meio do software REF-ET.

3. Resultados e Discussão

A variabilidade dos elementos climáticos para as estações de Cruzeiro do Sul, Porto Walter e Marechal Thaumaturgo estão presentes na Figura 2. O maior valor de temperatura do ar (33°C), radiação solar acumulada (18 MJ m² dia⁻¹) e a evapotranspiração de referência (5,8 mm) ocorre nos meses de setembro e outubro. A velocidade do vento tem baixa variação média ao longo do ano, com exceções de picos isolados no mês de novembro. A temperatura média anual situa-se em torno de 28°C, com as máximas não ultrapassando os 33°C e as mínimas superiores a 20°C.

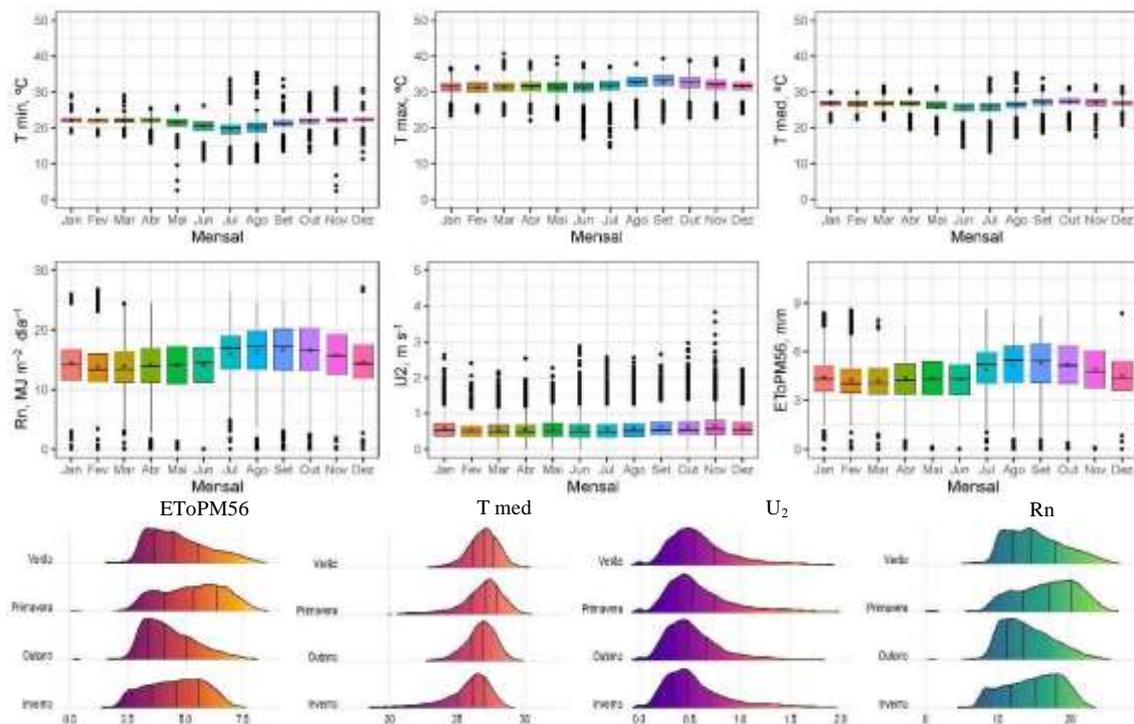
A média da ETo acumulada anual, resultante de um período de observações de 36 anos está entre 1715 e 1728 mm ano⁻¹. A estação automática de Cruzeiro do Sul apresenta uma média de 1715±132,70 mm ano⁻¹. As estações automáticas de Marechal Thaumaturgo e Porto Walter apresentam médias de 1728±128,81 mm ano⁻¹ e 1721±131,65 mm ano⁻¹ respectivamente.

Observa-se que a distribuição dos dados diários de radiação solar e a evapotranspiração são semelhantes nas estações do verão e outono, obtendo as menores

médias, assim como ocorre as semelhanças na distribuição dos dados das estações da primavera e inverno. Esses dados demonstram a existência de duas “estações” distintas na Bacia do Alto Juruá.

Na Figura 2 são apresentados em boxplot a simetria na variação dos dados de temperatura do ar mínima, máxima e média, radiação solar acumulada, velocidade do vento médio e ETo estimada através do método de Penman-Monteith (EToPM56) de todas as três estações avaliadas.

Figura 2. Variabilidade dos dados de temperatura do ar mínimo (T min) máximo (T max), média (T med), radiação solar acumulada (Rn), velocidade do vento médio (U₂) e evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão de Penman-Monteith (EToPM56), para as três estações meteorológicas



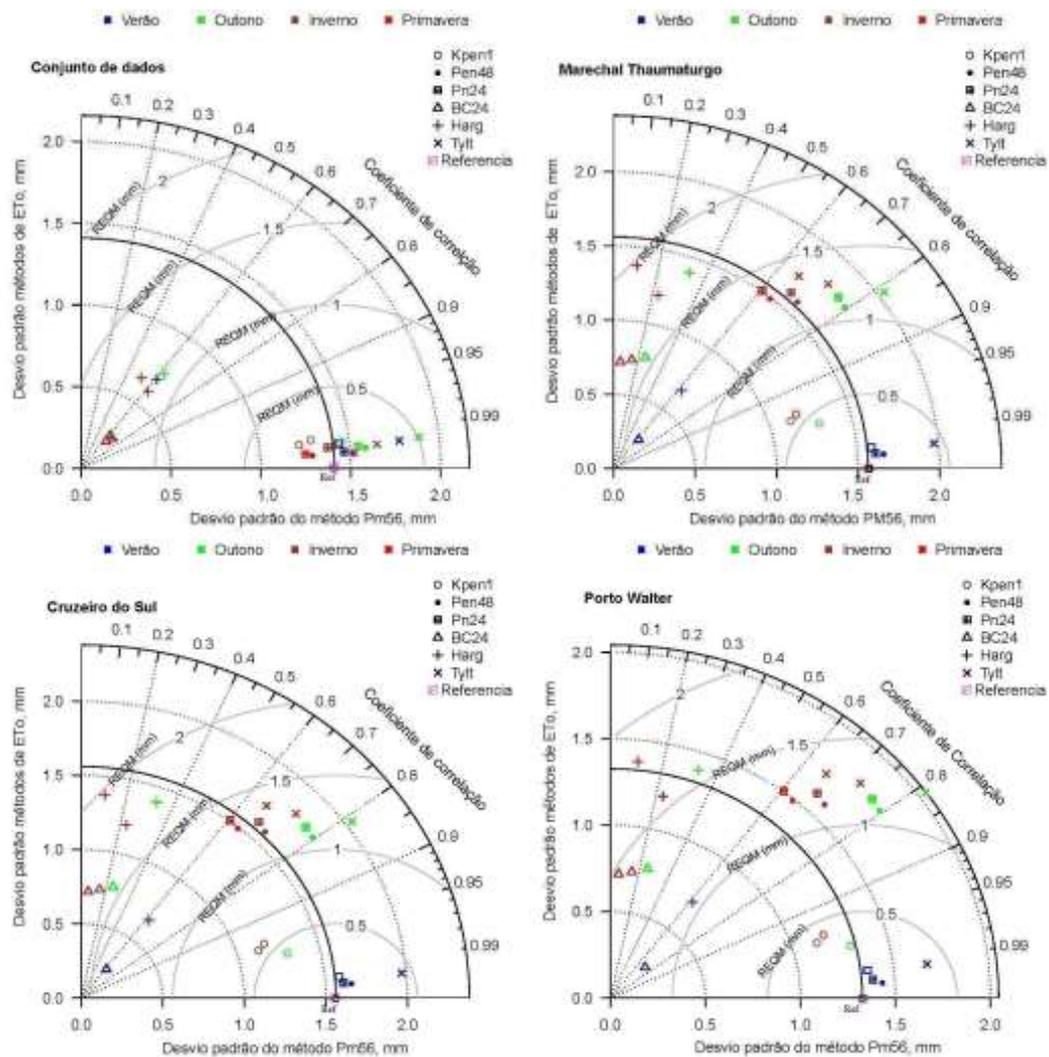
Fonte: Autores.

O diagrama de Taylor (Figura 3) fornece graficamente o desvio-padrão, coeficiente de correlação (R^2) e a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças (REQM) centralizadas dos dados do método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 (PM56) com os demais métodos de estimativas. A distância radial do ponto de origem é proporcional ao desvio-padrão dos dados interpolados e, em azimute do ponto, é o valor do coeficiente de correlação dos dados dos métodos de ETo e os dados do método padrão PM56. De acordo com Pereira, et al. (2014) quanto mais próximo um método à referência (PM56), melhor o método de estimativa

de evapotranspiração. Dentre os seis métodos de estimativa de ETo foram representados por um símbolo e diferenciados com uma cor, correspondendo as estações climáticas anual nas três estações meteorológicas de Cruzeiro do Sul, Porto Walter e Marechal Thaumaturgo.

A Figura 3 apresenta o Diagrama de Taylor, o qual conta com desvio padrão, coeficiente de correlação e raiz quadrada média do quadrado das diferenças centralizadas de cada uma das três estações avaliadas. A Figura conta ainda com a apresentação das quatro estações do ano, onde cada estação é representada por uma cor diferente no Diagrama. Ademais, a Figura conta com os métodos de determinação da ETo avaliados, onde cada método é representado por um símbolo no Diagrama.

Figura 3. Diagrama de Taylor representando o desvio-padrão, o coeficiente de correlação e a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas (REQM) dos dados do método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 (PM56) com os demais métodos de estimativas: Pennan Original (Pen48), Penman Modificado (Pen24), Blaney-Criddle (BC24), Hargreaves-Samani (Harg), Priestley-Taylor (Tylr) e Kimberly Penman. (KPen1) nas quatro estações meteorológicas



Fonte: Autores.

De acordo com a Figura 3, nas três estações automáticas, os modelos de Pennan Original (Pen48) no verão e Penman Modificado (Pen24) no inverno e primavera foram os que mais se aproximaram do método padrão de PM56. No outono, o método de Kimberly Penman (Kpen1) foi o que mais se aproximou do método padrão para as três estações meteorológicas.

Avaliando as três estações automáticas em conjunto de dados, referentes ao verão, outono, inverno e primavera, os métodos de Penman Modificado (Pen24), Kimberly Penman (Kpen1), Pennam Original (Pen48) e Pennam Original (Pen48) foram os que mais se aproximaram ao método padrão de PM56, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 3.

Foi possível constatar que, considerando-se as estações do ano, o método mais indicado para o verão, inverno e primavera é o de Pennam Original (Pen48). Embora o diagrama de Taylor destaque que o método Penman Modificado (Pen24) seja o ideal para o verão, é possível substituí-lo pelo método de Pennam Original (Pen48) a fim de tentar uniformizar os métodos de determinação da ETo, uma vez que ambos possuem os mesmos dados meteorológicos de entrada. Porém, para o outono, o método que mais se aproximou foi o de Kimberly Penman (Kpen1).

No entanto, tais métodos necessitam de alta demanda de dados meteorológicos de entrada, e, levando-se em consideração a escolha de um método com uma menor exigência de dados e de simples processamento caso não seja possível utilizar os métodos aproximados ao de PM56, é interessante apontar outros preceitos para determinação da ETo.

Neste sentido, ainda considerando como critério de escolha o método que mais se assemelha ao padrão (PM56), para a estação automática de Marechal Thaumaturgo, para as estações verão, inverno, outono e primavera foi o de Priestley-Taylor (Tylr), onde apresenta desvio padrão entre 0,5 e 2,5, REQM abaixo de 0,5 indo até 1,5 e coeficiente de correlação entre 0,80 e 0,99, em que o desvio padrão apresenta valores aproximados ao do padrão (desvio padrão = 1,3 na primavera), no qual, dentre os valores de REQM, apenas o de verão foi que mais se aproximou (REQM=0,3 no verão).

Na cidade de Campos Sales, Cratêus, Jaguaruana e Guaramiranga, o método de Kimberly Penman (KPen1) foi um dos métodos indicados para determinação da ETo em período mensal (Araújo et al., 2010) o que corrobora com o presente trabalho. No estado do Mato Grosso do Sul, o método de Priestley-Taylor (Tylr) também foi um dos métodos indicados para determinação da ETo em escala diária e mensal (Aparecido et al., 2020), essa resposta provavelmente está relacionada à características semelhantes. Para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas no estado do Pará, a ETo pode ser estimada de forma confiável a partir de métodos baseados em radiação solar e temperatura média do ar, onde dentre os oito métodos avaliados para essa região, o método de Priestley-Taylor (Tylr) foi um dos que atendeu esses requisitos e apresentou bons ajustes.

No conjunto dos dados, foi possível observar que o método mais indicado para a definição da ETo, levando-se em consideração as quatro estações do ano, foi o de Priestley-Taylor (Tylr), com valores relativamente próximos ao padrão, com exceção do desvio padrão, onde o maior valor se mostrou no período do outono (desvio padrão= 2,00 mm dia⁻¹). Esse método foi o indicado para a cidade de Garanhuns/PE, com R²= 0,92 para primavera-verão e R²=0,97 para o outono-inverno (Borges et al., 2012). Para a cidade de Ituiutuba/MG, o método de Priestley-Taylor (Tylr) também foi o indicado, porém como método alternativo ao de Camargo, por não apresentar diferença significativa com o método escolhido (Mello et al., 2017).

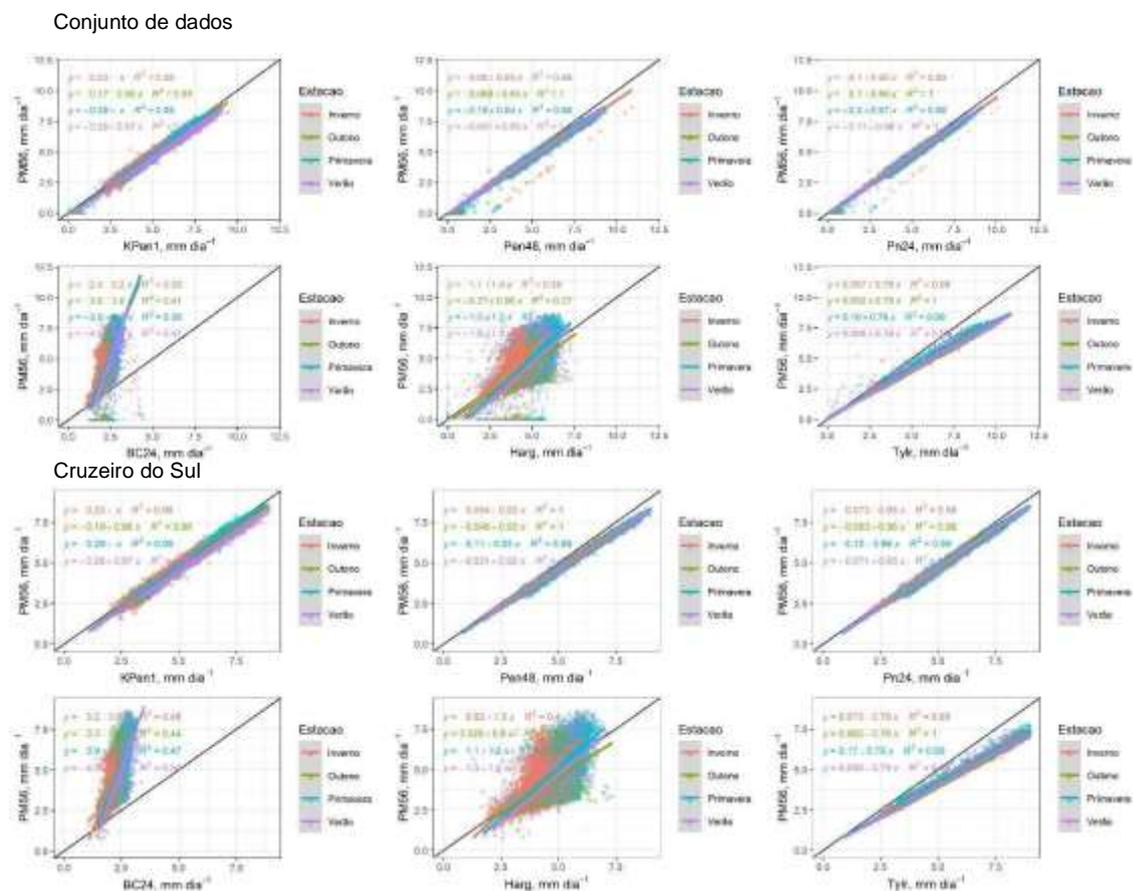
As Figuras 4 e 5 apresentam os valores diários de ETo, correspondentes aos períodos das quatro estações do ano estimados pelo método padrão (PM56) em comparação com os outros métodos. Nota-se que o método de Blaney-Criddle (BC24), no conjunto de dados, apresenta valores extremamente superestimados em relação ao modelo padrão (PM56), e que apresenta R² abaixo de 0,50 para todas as estações do ano assim como o método de Hargreaves-Samani (Harg). Particularmente para o método Harg, esse comportamento era esperado, tendo em vista que métodos baseados na temperatura do ar superestimar a ETo de 15 a 25% em climas úmidos, conforme relatado por Jensen et al. (1990).

Para a cidade de Cruzeiro do Sul, o método de Hargreaves-Samani (Harg), em uma escala mensal, superestima os valores em relação ao modelo padrão (PM56) em todos os meses do ano (Souza et al., 2011). De acordo com Munhoz et al. (2012), um dos métodos de melhor ajuste para a região Norte foi o de Blaney-Criddle (BC24), no entanto, esse método apresenta ajustes insatisfatórios para a o conjunto de dados analisado quando comparado ao método padrão (PM56). Segundo Santana et al. (2018), esses desempenhos insatisfatórios, podem ser atribuídos à simplicidade de suas equações que conferem menor precisão ao método, pois a maioria apresenta um número reduzido de parâmetros de entrada na estimativa da evapotranspiração.

Na estação automática de Cruzeiro do Sul, o método de Priestley-Taylor (Tylr) apresenta uma taxa de variação com cerca de 90%, ou seja, o método superestima os valores em 21% em relação ao modelo padrão (PM56). A estação automática de Marechal Thaumaturgo apresenta as mesmas condições da estação automática de Cruzeiro do Sul, assim como a estação automática de Porto Walter, sendo o método indicado para o verão, inverno e primavera. Já o método de Kimberly Penman (KPen1), indicado para o outono, apresenta uma taxa de variação em torno de 98% e também superestima os valores em até 3%.

A Figura 4 apresenta os gráficos de análise de regressão do conjunto de dados, ou seja, das três estações meteorológicas juntas e da estação meteorológica de Cruzeiro do Sul. Cada gráfico presente na imagem representa a análise de regressão de cada método testado. O gráfico conta ainda com representação das quatro estações do ano na análise de regressão, onde cada cor é representada por uma estação do ano.

Figura 4. Análise de regressão da ETo em escala diária entre os métodos de Pennan Original (Pen48), Penman Modificado (Pen24), Blaney-Criddle (BC24), Hargreaves-Samani (Harg), Priestley-Taylor (Tylr) e Kimberly Penman. (KPen1) comparados com o método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 (PM56) no conjunto de dados e estação de Cruzeiro do Sul.



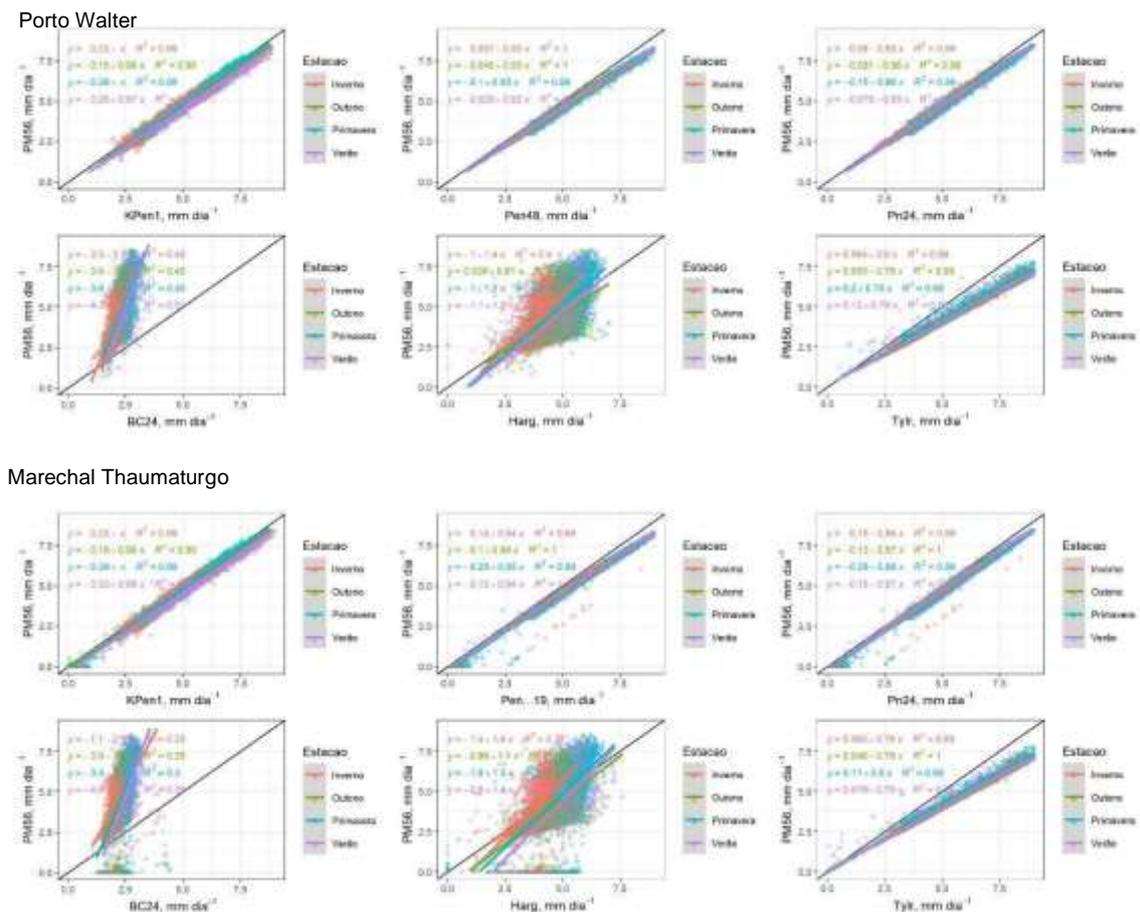
Fonte: Autores.

No conjunto de dados, como mostra a Figura 4, o método de Priestley-Taylor (Tylr) apresenta uma taxa de variação idêntica ao observado nas três estações automáticas separadamente, assim como também superestima os valores em relação ao modelo padrão (PM56). No método de Priestley-Taylor (Tylr), nota-se que ocorre pequena dispersão ao redor da linha de regressão, em comparação ao método de Hargreaves-Samani (Harg). Na região de

Sorriso/MT, foi observado que o método de Priestley-Taylor (Tylr) tende a superestimar os valores em relação ao método padrão (PM56) (Sobenko et al., 2016). Independente dos modelos para cada estação do ano nas três estações automáticas, os valores em relação ao modelo padrão foram superestimados.

A Figura 5 apresenta as análises de regressão de cada método avaliado para as estações de Porto Walter e Marechal Thaumaturgo, respectivamente. O gráfico conta ainda com representação das quatro estações do ano na análise de regressão, onde cada cor é representada por uma estação do ano.

Figura 5. Análise de regressão da ETo em escala diária entre os métodos de Pennan Original (Pen48), Penman Modificado (Pen24), Blaney-Criddle (BC24), Hargreaves-Samani (Harg), Priestley-Taylor (Tylr) e Kimberly Penman (KPen1) comparados com o método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 (PM56) na estação de Porto Walter e Marechal Thaumaturgo.



Fonte: Autores.

4. Considerações Finais

Como método alternativo, o de Priestley-Taylor foi o mais adequado para as três estações automáticas, a exceção da estação automática de Porto Walter, em que esse método foi indicado apenas para o verão, inverno e primavera sendo o método de Kimberly Penman o mais indicado para o outono.

Novos estudos em diferentes localidades sob clima tropical equatorial deverão ser realizados, visando a validação e a eficiência dos métodos de estimativas alternativos da evapotranspiração para regiões úmidas e semiúmidas.

Referências

Allen, R. G. (2013). REF-ET: *Reference evapotranspiration calculation software for FAO and Asce standardized equations - version 3.1*. University of Idaho research and extension center.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Howell, T. A.; Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899-920.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO - Irrigation and Drainage Paper, 56. FAO, Rome.

Almeida, B. M.; Araújo, E. M.; Cavalcante, E. G. J.; Oliveira, J. B.; Araújo, E. M.; Nogueira, B. R. C. (2010). Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 4(2), 93-98.

Almorox, J.; Quej, V. H.; Martí, P. (2015). Classificação de desempenho global de abordagens baseadas em temperatura para estimativa de evapotranspiração considerando as classes climáticas de Köppen. *Journal Hydrologic*. 528, 514-522.

Almorox, J.; Senatore, A.; Quej, V. H.; Mendicino, G. (2018). Worldwide assessment of the Penman–Monteith temperature approach for the estimation of monthly reference evapotranspiration. *Theoretical and Applied Climatology*. 131, 693-703.

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Moraes, G. J. L. (2013). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. 113, 407-427.

Aparecido, L. E. O.; Meneses, K. C.; Torsoni, G. B.; Moraes, R. S. C.; Mesquita, D. Z. (2020). Accuracy of potential evapotranspiration models in different time scales. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 35(1), 63-80.

Araújo, E. M.; Oliveira, J. B.; Araújo, E. M.; Ledo, E. R. F.; Silva, M. G. (2010). Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Pennan Monteith FAO56, em cidades do estado do Ceará. *Revista ACTA Tecnológica*. 5(2), 84-101.

Blaney, H. F.; Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *Tech. Pubis. Soil Conserv. Serv.* 96, 1-48.

Borges, J. C. F.; Anjos, R. J.; Silva, T. J. A.; Lima, J. R. S.; Andrade, C. L. T. (2012). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 16(4), 380-390.

Delgado, R. C.; Souza, L. P.; Almeida, C. T. (2017). Orbital and surface evapotranspiration compared to Fao-56 standard in state of Acre. *Irriga*. 22(3), 547-559.

Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. *Crop water requirements*. (1977). Rome: FAO. Irrigation and drainage paper, 24.

Fernandes, A. L. T.; Júnior, E. F. F.; Takay, B. Y. (2011). Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 19, 270-276.

Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1(2), 96-99.

Irmak, S.; Irmak, A.; Allen, R. G.; Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(5), 336-347.

Jensen, M. E.; Burman, R. D.; Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York: ASCE. 332 p.

Lu, J.; Sun, G.; McNulty, S.; Amatya, D. M. (2005). A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 41(3), 621-633.

Makkink, G. F. (1957). Ekzameno de la formula de Penman. Neth. *Journal Agricultural Science*. 5(1), 290-305.

Mello, A. J. S.; Rozeno, G. S.; Silva, J. A. R.; Mello, M. L. (2017). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a cidade de Ituiutaba, MG. *Revista Horizonte Científico*. 11(2), 1-12.

Munhoz, J. S. B.; Oliveira, S. F.; Marin, F.; Battisti, R. (2012). Estimativa da evapotranspiração de referência no Brasil: uma análise crítica. *Embrapa Informática Agropecuária*.

Naghetini, M.; Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM. 552p

Oudin, F.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andreassian, V.; Antcil, F.; Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall runoff modelling. *Journal Hydrologic*. 303(1), 290-306.

Paiva, C. M.; Souza, A. S. P. (2016). *Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação*. Anuário do Instituto de Geociências. 39(1), 42-51.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceeding Royal Society*.193, 120-143.

Pereira, A. R.; Sedyama, G. C.; Villa Nova, N. A. (2013). *Evapotranspiração*. Campinas: Fundag. 323p.

Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM.

Pereira, D. P.; Lima, J. S. S.; Xavier, A. C.; Passos, R. R. Fiedler, N.C. (2014). Aplicação do diagrama de Taylor para avaliação de interpoladores espaciais em atributos de solo em cultivo com eucalipto. *Revista Árvore*. 38, 899-905.

Pereira, L. S.; Allen, R. G.; Smith, M.; Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*. 147, 4-20.

Priestley, C. H. B. & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, 81-92.

R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Santana, J. S.; Lima, E. F.; Silva, W. A.; Fernandes, M. C.; Ribeiro, M. I. D. (2018). Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Balsas-MA. *Enciclopédia Biosfera*. 15(27), 1-14.

Sentelhas, P. C.; Gillespie, T. J.; Santos, E. A. (2010). Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*. 97(5), 635-644.

Sobenko, L. R.; Fanaya Júnior, E. D.; Santos, O. N. A.; Marques, P. A. A. (2016). Estimativa da Necessidade de Irrigação na Cultura do Milho “ Safrinha ” em Sorriso-MT por Métodos Agroclimatológicos. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*. 15(1), 73-85.

Sousa, J. W. and Oliveira, P. F. (2018). Risco climático para o café conilon (*Coffea canephora*) nos municípios de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul, AC. *Revista brasileira de ciências da Amazônia*. 7(1), 31-40.

Souza, L. P.; Farias, O. S.; Moreira, J. G. V.; Gomes, F. A.; Frade Júnior, E. F. (2011). Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Cruzeiro do Sul - Acre. *Enciclopédia biosfera*. 7(12), 1-8.

Souza, M. L. A.; Sousa, J. W. (2020). Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. *Scientia Naturalis*. 2(1), 254-267.

Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*. 12, 13-49.

Valiantzas, J. D. (2013). Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited data. *Journal Hydrology*, 505(15), 13-23.

Wright, J. L. & M. E. Jensen. (1972). Peak water requirements of crops in Southern Idaho. *Journal Irrigation and Drainage*. Div. ASCE. 96(1),193-201.

Xavier, A. C.; King, W.; & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980 – 2013). *International Journal of Climatology*, 36, 2644-2659.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Jefferson Vieira José – 30%

Lívia Braz Pereira – 30%

Hugo Motta Ferreira Leite – 10%

Lucas da Costa Santos – 10%

Timóteo Herculino da Silva Barros – 10%

Kelly Nascimento Leite – 10 %