



Evaporação no semiárido: análise de sensibilidade e comparação de métodos para estimativa

Tays Ferreira Barros¹, Márcia Bruna Marim de Moura², Thieres George Freire da Silva³, José Edson Florentino de Moraes⁴, Carlos André Alves de Souza⁵, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim⁶, Magna Soelma Beserra de Moura^{7,8}, Luciana Sandra Bastos de Souza⁹

¹ Mestranda em Biodiversidade e Conservação (PGBC), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. tayssferreira@gmail.com (autor correspondente). ² Mestranda pelo PGBC/UAST/UFRPE, E-mail: marcia.bruna@ufpe.br. ³ Professor Dr. Associado IV, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco, E-mail: thieres_freire@yahoo.com.br. ⁴ Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, PPEA/UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n – Dois Irmãos CEP 52.171.900 – Recife-PE, E-mail: joseedson50@gmail.com. ⁵ Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola PPEA/UFRPE, E-mail: carlosandrealdesouza186@gmail.com. ⁶ Doutor em Engenharia Agrícola, Pesquisador bolsista na Universidade Estadual Paulista (UNESP), CEP 13506-900, Rio Claro, São Paulo, Brasil. E-mail: alexandremrfj@gmail.com. ⁷ Pesquisadora na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Embrapa Agroindústria Tropical, CEP 60511-110, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: magna.moura@embrapa.br. ⁸ Pesquisadora na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Embrapa Semiárido, CEP 56302970, Petrolina, Pernambuco, Brasil. E-mail: magna.moura@embrapa.br. ⁹ Professora Adjunta IV, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. E-mail: sanddrabastos@yahoo.com.br

Artigo recebido em 10/05/2024 e aceito em 19/09/2024

RESUMO

O conhecimento das taxas de evaporação é crucial para o planejamento do uso dos recursos hídricos. No entanto, sua quantificação requer diversos dados meteorológicos e pode ser influenciada de maneira distinta por esses fatores. Este estudo teve como objetivos: i) analisar a sensibilidade da evaporação obtida pelo Tanque Classe “A” (TCA) e estimada pelo método de Penman (1948) às variáveis meteorológicas; e ii) investigar as correlações entre os valores de evaporação do TCA e a evaporação estimada pelos métodos de Linacre (1993) e Kohler (1955) em relação aqueles obtidos pelo método de Penman (1948). Foram utilizados dados diários obtidos para um período de trinta anos, por meio de uma estação meteorológica localizada em Juazeiro, Bahia. Os valores de E obtidos pelo TCA e pelo método de Penman foram correlacionados com as variáveis meteorológicas através de análises de regressão. Além disso, foram determinados os valores de E utilizando métodos alternativos: Linacre (1993) e Kohler (1955), os quais foram correlacionados com os valores obtidos pelo método de Penman (1948), considerado padrão neste estudo. A proximidade dos valores foi avaliada utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (r^2) e o índice de concordância de Willmott (d). Os resultados mostraram que os valores de evaporação medida pelo TCA e estimada pela equação de Penman (1948) foram sensíveis ao déficit de pressão de vapor. A evaporação obtida pelo Tanque Classe A e estimada pelo método de Linacre (1993) apresentaram maior aproximação com aquela obtida pelo modelo de Penman (1948). Sugere-se que análises sejam realizadas para identificar a adequação de diferentes métodos a escalas de tempo variadas. Palavras-chave: Semiárido Penman; Variáveis meteorológicas

Evaporation in the semi-arid region: sensitivity analysis and comparison of estimation methods

ABSTRACT

Knowledge of evaporation rates is crucial for planning the use of water resources. However, its quantification requires diverse meteorological data and can be influenced differently by these factors. This study aimed to: i) analyze the sensitivity of evaporation obtained by the Class “A” Tank (TCA) and estimated by the Penman method (1948) to negative influences; and ii) investigate the correlations between the TCA evaporation values and the evaporation estimated by the methods of Linacre (1993) and Kohler (1955) in relation to those by the method of Penman (1948). Daily data obtained for a period of thirty years was used, through a meteorological station located in Juazeiro, Bahia. The E values obtained by TCA and the Penman method were correlated with the indirect variables through regression analyses. Furthermore, E values were determined using alternative methods: Linacre (1993) and Kohler (1955), which were correlated with the values obtained by the Penman method (1948), considered standard in this study. The proximity of the values was evaluated using Pearson's representation coefficient (r), the determination coefficient (r^2) and Willmott's agreement index

(d). The results demonstrated that the evaporation values measured by TCA and estimated by Penman's research (1948) were sensitive to vapor pressure deficiency. The evaporation obtained by the Class A Tank and estimated by the Linacre method (1993) was closer to the result obtained by the Penman model (1948). Suggest that analyzes be performed to identify the suitability of different methods on varying time scales.

Keywords: Semiárid; Penman; Meteorological variables

* E-mail para correspondência:

tays.ferreira@ufrpe.br (Barros, T. F).

Introdução

O conhecimento da evaporação auxilia no planejamento, no gerenciamento e na sustentabilidade de utilização dos recursos hídricos (Oliveira et al., 2019; Brito et al., 2021). Sobretudo em regiões semiáridas, o entendimento deste parâmetro torna-se fundamental, logo que pode ser utilizado para melhorar o manejo de água, possibilitando aumentar a disponibilidade hídrica e a qualidade de vida da população, consequentemente contribuindo para diminuir o impacto do déficit no desenvolvimento econômico e social (J. B. de F. Mesquita et al., 2020; Silva et al., 2019)

No ambiente natural, as taxas de evaporação são dependentes da interação de vários fatores (i.e. meteorológicos, topográficos e etc.) (Han et al., 2023; Han et al., 2022). Elementos como radiação solar, temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor desempenham papéis cruciais. Por exemplo, a radiação solar proporciona a energia necessária para a evaporação, enquanto a temperatura do ar influencia a quantidade de vapor d'água que o ar pode conter (Teixeira Filho et al., 2023).

A precipitação afeta a quantidade de água disponível no ambiente (Wen et al., 2024). Enquanto que, o vento e o déficit de pressão de vapor estão associados a perda de água da superfície (Li et al., 2023; Wijaya et al., 2024). As características topográficas, por outro lado, têm sido associadas às variações na disponibilidade de energia que podem culminar em alterações nas taxas de evaporação (Jardim et al., 2021; Souza et al., 2022; Teixeira Filho et al., 2023).

A evaporação dos reservatórios pode influenciar consideravelmente sua viabilidade e estabilidade temporal no abastecimento hídrico, sendo capaz de intensificar o problema de escassez desse recurso, especialmente em regiões secas (Han et al., 2023). Adicionalmente, pode influenciar na qualidade da água (Monicelli et al., 2023; Monteiro et al., 2021). Partindo disso, a evaporação tem sido determinada por métodos diretos (Tanque 20 m², Correlações Turbulentas, Tanque Classe "A" - TCA) e indiretos (Balanço de

energia pela razão de Bowen - BERB, Penman (1948), Camargo (1997), Linacre (1993), Kohler (1955) (Coelho et al., 2018; França et al., 2020; Han et al., 2022).

Na determinação da evaporação em grandes superfícies, o método de Penman (1948) muitas vezes tem sido considerado como o padrão de referência (Hussein, 2022). Este método integra múltiplas variáveis meteorológicas, incluindo radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, para calcular a taxa de evaporação de maneira precisa (Vieira et al., 2016; Santos et al., 2021; Sanches et al., 2023). No entanto, a aplicação do método de Penman (1948) é limitada pela necessidade de uma quantidade substancial de dados meteorológicos, que frequentemente não estão disponíveis em todas as regiões ou épocas do ano (Uliana et al., 2024). Isso pode dificultar sua implementação contínua e precisa, especialmente em áreas com infraestrutura limitada para a coleta de dados meteorológicos.

A utilização de métodos simplificados para quantificação da evaporação, que necessitam de uma quantidade reduzida de dados, mas ainda assim incorporam os principais fatores envolvidos na transferência de calor e água entre a superfície e a atmosfera, compreende uma alternativa viável. Esses métodos são projetados para considerar elementos fundamentais (i.e. temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) mesmo quando a disponibilidade de dados é limitada (Hussein, 2022; Han et al., 2022; Han et al., 2023).

Nesse contexto, Vieira et al. (2016) observaram que o método do Tanque Classe "A" (TCA) apresentou estimativas de evaporação mensal para o Lago de Três Marias que se aproximaram dos valores obtidos pela equação de Penman (1948), considerado como padrão. Esse resultado mostra o potencial do uso do TCA em fornecer medidas precisas da evaporação em diferentes corpos d'água (Vieira et al., 2016; Sanches et al., 2023; Júnior et al., 2024).

Nos reservatórios de Tucuruí, estado do Pará e Lajeado-TO os métodos de Linacre (1993), de Kohler et al. (1955) não apresentaram boa adequação na estimativa da evaporação média

anual em relação aos resultados obtidos pelo método de Penman (1948) (Coelho et al., 2018). No entanto, segundo estes autores, na estação seca, houve bons resultados para o método de Linacre (1993) no reservatório de Tucurí-PA (Coelho et al., 2018), demonstrando que na escolha do modelo a ser utilizado para estimativa da evaporação é preciso levar em consideração as condições climáticas, intervalo de tempo, dados utilizados, etc. (Han et al., 2022; Hussein, 2022).

É partindo disso, que o presente trabalho objetivou: 1) analisar a sensibilidade da evaporação obtida pelo Tanque Classe “A” (TCA) e pelo método de Penman (1948) às variáveis meteorológicas e 2) investigar a proximidade dos valores de evaporação do TCA e os estimados com métodos de Linacre (1993) e de Kohler (1955) em relação àqueles estimados com o método de Penman (1948).

Material e métodos

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos através de uma estação meteorológica convencional localizada no Campo Experimental de Mandacaru, que pertence à Embrapa Semiárido e está situada em Juazeiro, na Bahia. A localização geográfica do campo experimental é de 09° 24' S de latitude e 40° 26' O de longitude. Esta área é caracterizada por um regime pluviométrico com precipitação média anual de 550 mm, uma temperatura média anual de 26,7 °C, e um balanço hídrico negativo, indicando que a evapotranspiração excede a precipitação na maioria do ano. Essas condições são representativas de regiões semiáridas, tornando este local ideal para a pesquisa sobre métodos de estimativa de evaporação (Figura 1).

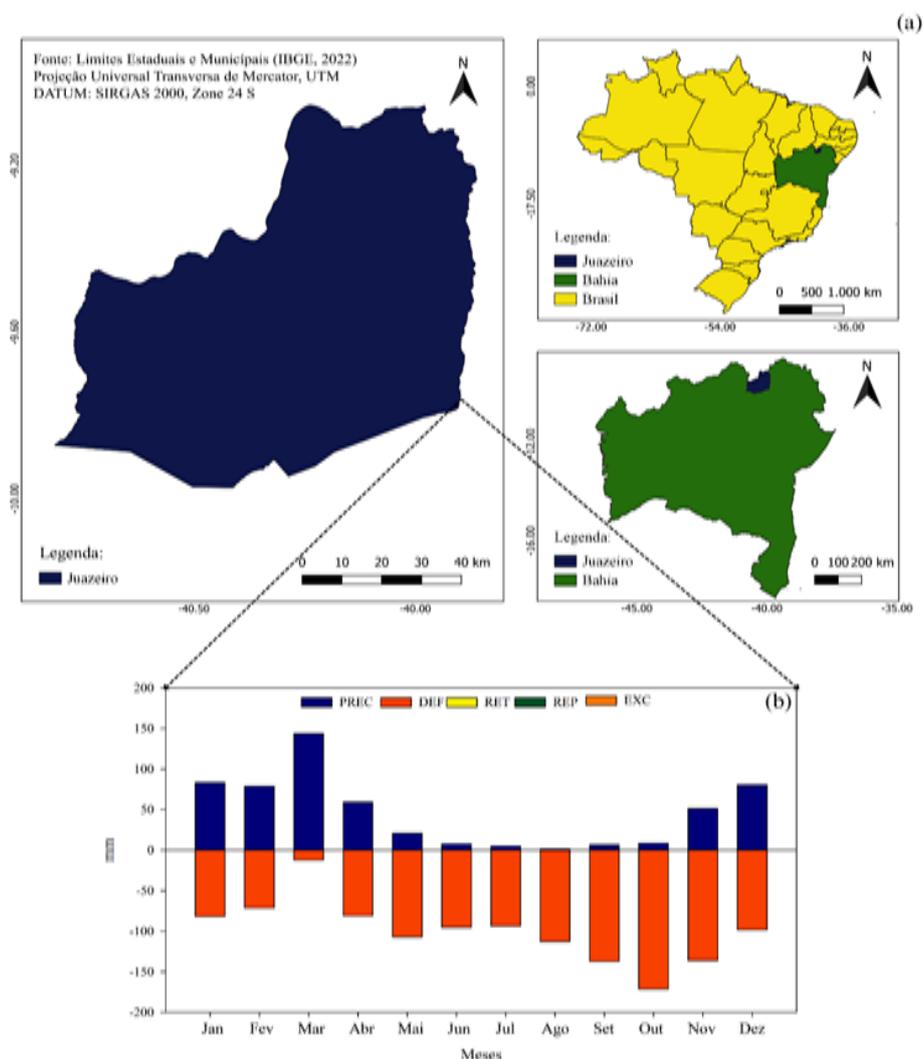


Figura 1. Localização do Campo Experimental de Mandacaru, no município de Juazeiro-BA (a) e extrato do hídrico climatológico: PREC – precipitação, DEF – deficiência hídrica, RET – retirada de água, REP – reposição de água, EXC – excesso hídrico, durante o período de 30 anos (b).

Foram utilizados dados diários de temperatura máxima (T_x), mínima (T_n) e média (T_m), umidade relativa máxima (UR_x), mínima (UR_n) e média (UR_m), velocidade do vento (V_v), precipitação (P) e radiação solar global (R_g), para os anos de 1969-1999, totalizando 5149 dias de observações.

Durante o período analisado os maiores volumes de precipitação pluvial concentraram-se

entre os meses de novembro a abril (90% do total anual). A temperatura foi dependente da radiação solar global (R_g) e neste caso, os menores valores médios ocorreram no mês de julho (24,6 °C), enquanto as maiores temperaturas ocorreram no mês de novembro ($T_m=29,1$ °C). A radiação solar global (R_g) apresentou pouca variação anual, com valores médios de 18,52 MJ.m⁻².dia⁻¹ (Figura 2).

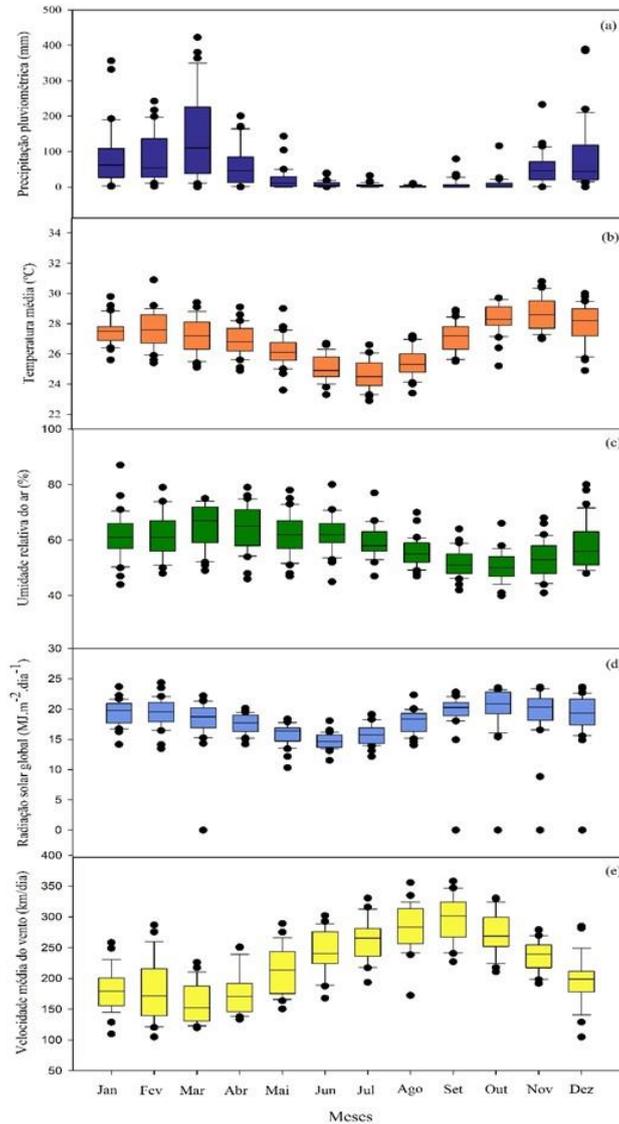


Figura 2. Variação dos elementos meteorológicos: (a) precipitação pluviométrica (P , mm), (b) temperatura média do ar (T_m , °C), (c) umidade relativa do ar (UR , %), (d) radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹) e velocidade do vento (V_v , m.s⁻¹) o Campo Experimental de Mancadaru, Juazeiro-BA, entre os anos de 1969 e 1999.

As informações meteorológicas foram analisadas e processadas para a determinação da pressão real de vapor (e_a , kPa) e da pressão de saturação de vapor (e_s , kPa), segundo Pereira et al. (2004):

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (1)$$

$$e_s = 0,61078 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T_m}{237,3 + T_m}\right)} \quad (2)$$

em que: UR_m é a umidade relativa média (%) e T_m é a temperatura média do ar (°C).

Esses dados foram utilizados no cálculo do déficit de pressão de vapor (DPV, kPa) por meio da

diferença entre a pressão de saturação e a pressão atual de vapor: $DPV = e_s - e_a$.

Os dados da evaporação obtidos pelo Tanque Classe “A” (ECA) foram ajustados de acordo com o citado por Leitão et al. (2007): $E_{TCA} = ECA \times k_p$. Sendo o k_p = coeficiente do tanque, com valor médio aproximado de 0,7.

As informações de T_x , T_n , T_m , UR_x , UR_n , UR_m , V_v , P , R_g e o DPV foram correlacionados com a evaporação obtida pelo método de Penman (1948) (E_p) e pelo método do Tanque Classe “A” (E_{TCA}) por meio de regressões lineares e avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson.

Posteriormente, os valores da E_{TCA} e aqueles obtidos por meio de métodos de Kohler (1955) e de Linacre (1993) foram comparados com a E_p , considerado como padrão neste estudo.

A evaporação determinada pelo método de Penman (1948) (E_p) é expressa por (Leitão et al., 2007):

$$E_p = (sQ_n/L + \gamma E_a)/(s + \gamma) \quad (3)$$

em que: Q_n é o saldo de radiação; s é o coeficiente angular da curva de pressão de saturação ($hPa \text{ } ^\circ C^{-1}$) e E_a é o poder evaporante do ar ($mm \text{ dia}^{-1}$), obtido por meio da seguinte equação:

$$E(a) = f(u) \times D_a \quad (4)$$

onde: $f(u)$ é a função empírica relacionada a velocidade do vento à 2 m de altura calculada a partir da expressão: $f(u) = m \times (a + bu)$.

A evaporação pelo método de Kohler et al. (1955) - E_K foi determinada pela expressão (Leitão et al., 2007):

$$E_K = 0,7[(sQ_n + \gamma E_a)/(s + \gamma)] \quad (5)$$

A equação de Linacre (1993) para obtenção da evaporação (E_L) é expressa por:

$$E_L = (0,015 + 0,00042T_m + 10^{-6}h)[0,8Q_g - 40 + 2,5F u(T - T_d)] \quad (6)$$

em que: h é a altitude do local (m); Q_g é a irradiância solar na superfície do lago ($W \cdot m^{-2}$); u é a velocidade do vento (m/s) a 2 m de altura da superfície; F representa o fator de correção devido à altitude do local e T_d é a temperatura do ponto de orvalho ($^\circ C$).

A comparação entre os modelos para a estimativa de evaporação foi feita utilizando regressão linear e índices estatísticos para os quais consideraram-se (Coutinho et al., 2020; Silva et al., 2019): erro médio absoluto (EMA), raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de Camargo (c), que é a relação entre (r e d), conforme descrito abaixo (Tabela 1) (Willmott, 1985; Camargo; Sentelhas, 1997; Jardim et al., 2022).

Tabela 1. Equações utilizadas e valores ideais dos índices estatísticos e erros utilizados para analisar o desempenho dos modelos.

Símbolo	Equação	Valor ideal	Fonte
R	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(E_i - E_m)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2][\sum_{i=1}^n (E_i - E_m)^2]}}$	+1 ou -1	Figueiredo Filho (2009)
r^2	$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(E_i - E_m)}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)]^{0,5} [\sum_{i=1}^n (E_i - E_m)]^{0,5}}$	+1 ou -1	Hussein (2022)
d	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(E_i - O_m) + (O_i - O_m)]^2} \right]$	0 a 1	Willmott (1985)
EAM	$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n}$	0	(Santos et al., 2017)
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}}$	0	Legates & McCabe (1999)
c	$c = R \times d$	>0,85	Camargo e Sentelhas (1997)

em que: O_i : valores observados, O_m : média dos valores observados, E_i : valores estimados, E_m : média dos valores estimados, n : número de observações.

A Figura 3 apresenta uma síntese detalhada dos procedimentos adotados, ilustrando

cada etapa do processo de estimativa de evaporação. Essa visualização oferece uma

compreensão clara e concisa de toda a metodologia empregada, facilitando a avaliação dos resultados.

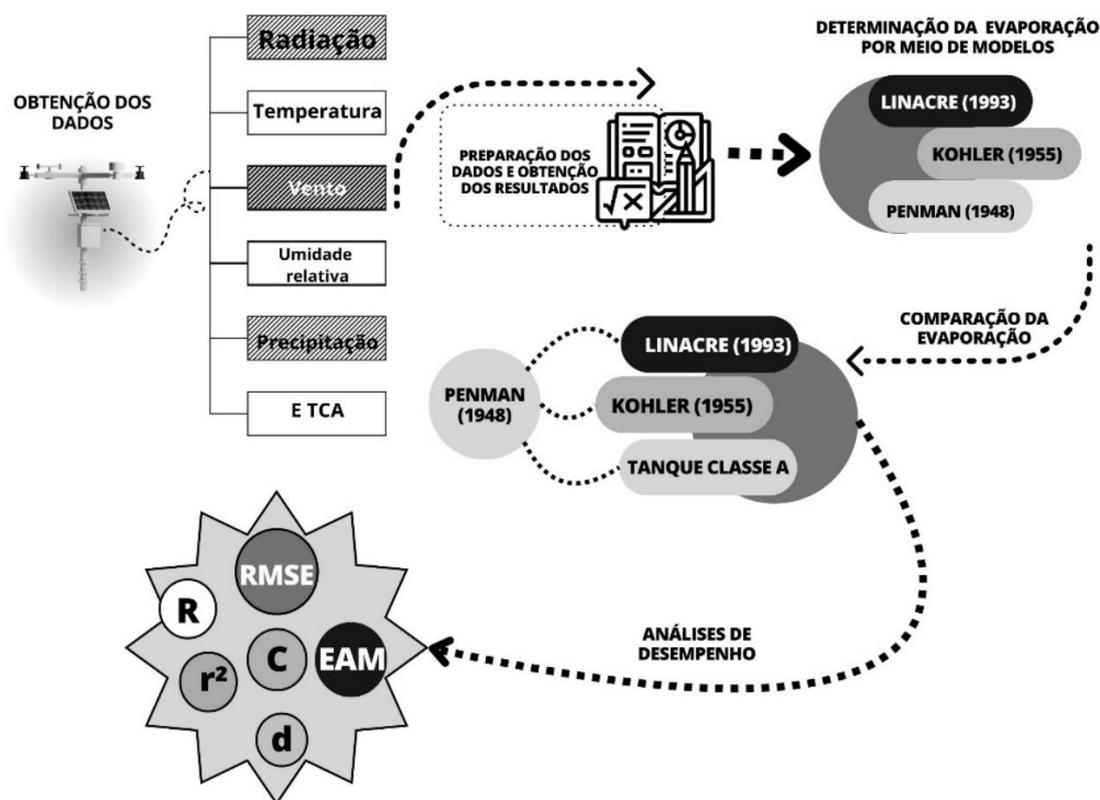


Figura 3. Fluxograma dos procedimentos adotados para estimativa da evaporação por meio de diferentes métodos, ilustrando cada etapa do processo.

Resultados e discussão

No período analisado, a chuva média foi de 547 mm, com 81% deste total ocorrendo entre os meses de dezembro à abril (DJFMA). Entre os meses de maio à novembro foram observados baixos volumes de chuvas ($P \sim 102$ mm acumulados durante MJJASON), especialmente entre agosto e outubro, quando a P representou apenas 2% do total anual. Nestes meses, a baixa disponibilidade hídrica associada aos altos níveis de radiação e elevadas temperaturas promoveu um incremento nos valores da evaporação, os quais atingiram médias de até 8 mm.dia^{-1} (evaporação pelo método de Penman (1948) - E_p) no mês de outubro.

Os valores médios de evaporação diária foram iguais a sendo $6,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ para o método

de Penman e $5,84 \text{ mm.dia}^{-1}$ a partir das medidas realizadas pelo TCA. Durante este período, os valores elevados de E e sua notável flutuação refletem a influência das escalas de tempo e dos elementos meteorológicos: temperatura, umidade e a radiação no processo de evaporação no ambiente, conforme detalhado na Tabela 3. Neste contexto, a análise exclusiva dos valores médios de E medidas a partir do TCA e estimadas pelo método de Penman (1948) não proporciona uma compreensão abrangente da amplitude das flutuações observadas ao longo do período analisado, como ilustrado na Figura 4. De modo que, a análise detalhada dessas oscilações é essencial para entender a complexidade dos fatores que influenciam a evaporação.

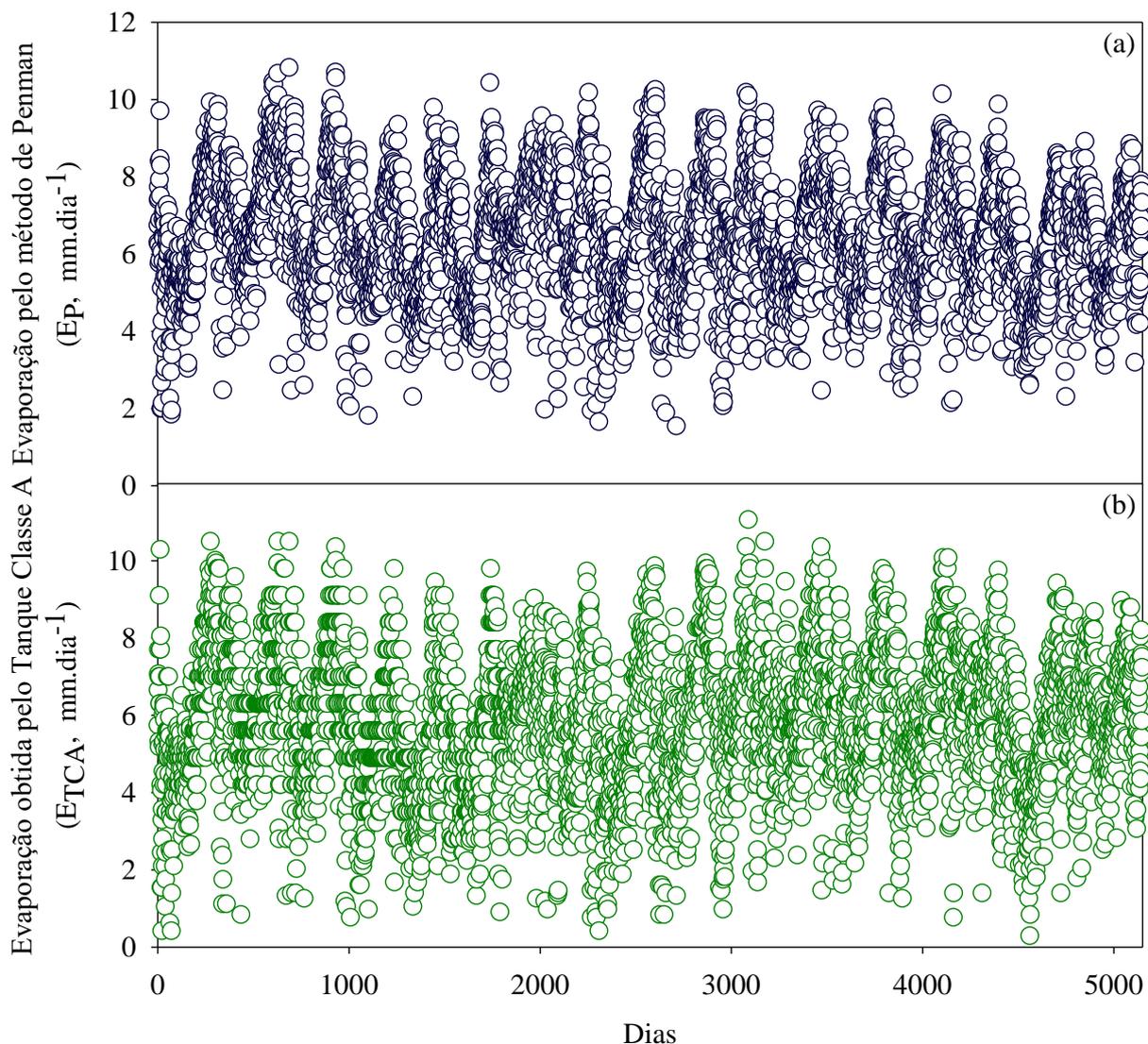


Figura 4. Comportamento da evaporação medida por meio do Tanque Classe “A” - E_{TCA} (a) e estimada pelo método de Penman (1948) - E_P (b), em Juazeiro-BA, 1969-1999.

A taxa de evaporação foi sensível a diferentes parâmetros. Notavelmente, a E_{TCA} mostrou-se mais influenciada pelo déficit de pressão de vapor - DPV, seguido pela umidade relativa do ar - UR e pela temperatura máxima - T_x . É importante destacar que as variáveis de temperatura e umidade relativa do ar são componentes essenciais no cálculo do DPV, que por sua vez reflete o efeito conjunto da demanda atmosférica sobre o processo de evaporação.

A evaporação estimada pelo método de Penman (1948) apresentou sensibilidade ao déficit de pressão de vapor e da radiação solar global - Q_g (Tabela 3). A sensibilidade da perda de água em ambientes secos ao déficit de pressão de vapor

(DPV) tem sido objeto de estudo e é considerada promissora para compreender o fluxo de água no ambiente, como documentado por Jerszurki et al. (2019), Souza et al. (2022) e Hussein et al. (2022). Por outro lado, Q_g representa a energia disponível no ambiente e influencia diretamente o processo evaporativo (Masiero et al., 2020). Em ambos os casos, foi observada uma baixa correlação entre os valores de E e T_n , com um coeficiente de determinação (R^2) inferior a 0,04. Este resultado indica que outros fatores além da temperatura noturna desempenham um papel significativo na determinação da taxa de evaporação.

Tabela 3. Sensibilidade da evaporação estimada pelo método de Penman (E_P) e medidas pelo Tanque Classe “A” (E_{TCA}) em relação as variáveis meteorológicas: Velocidade do vento (V_v , $m.s^{-1}$), Radiação solar global (Q_g , $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$), temperatura mínima (T_n , $^{\circ}C$), temperatura máxima (T_x , $^{\circ}C$), umidade relativa (UR , %), temperatura média (T_m , $^{\circ}C$) e déficit de pressão de vapor (DPV).

Relação da evaporação pelo método de Penman (1948) x Variáveis meteorológicas							
y = a + bx	Vv (m.s⁻¹)	Qg (MJ.m⁻².dia⁻¹)	T_n (°C)	T_x (°C)	UR (%)	T_m (°C)	DPV
a	4,83	0,82	3,01	-7,22	12,77	-7,86	2,65
b	0,59	0,30	0,16	0,43	-0,11	0,53	2,47
R ²	0,13	0,77	0,04	0,51	0,66	0,49	0,71
Relação da evaporação pelo Tanque Classe “A” (TCA) x Variáveis meteorológicas							
y = a + bx	Vv (m.s⁻¹)	Qg (MJ.m⁻².dia⁻¹)	T_n (°C)	T_x (°C)	UR (%)	T_m (°C)	DPV
a	3,67	1,71	3,18	-7,95	12,55	-7,76	1,94
b	0,80	0,22	0,1	0,43	-0,1	0,51	2,57
R ²	0,19	0,32	0,02	0,39	0,55	0,33	0,58

A E_{TCA} apresentou valores pouco subestimados quando comparados à E_P , com alterações observadas entre os períodos mais úmidos e secos (detalhamento não apresentado). Estas diferenças podem estar associadas às características específicas do tanque e mesmo ao valor do k_p adotado. Tais constatações têm sido discutidas na literatura, como evidenciado por Galvão et al. (2005) e Uliana et al. (2024). Segundo Galvão et al. (2005), em estudo realizado em Boqueirão e Patos – PB, foi possível constatar que a adoção do coeficiente do tanque de 0,7 pode resultar na incorrência de erros de subestimativas especialmente nos períodos úmidos. Este valor tem sido comumente empregado (Leitão et al., 2007; Galvão et al., 2005).

As análises comparativas da evaporação diária (Figura 5) obtida a partir do TCA e estimadas pelos métodos propostos por Linacre (1993) e Kohler (1955) em relação E_P revelaram que, E_L e E_K produziram menores diferenças ao longo de todo o período analisado, ou seja, maior

estabilidade nas flutuações dos dados (Figura 5). Apesar disso, constata-se que houve uma tendência à superestimativa para os valores estimados com o método de Kohler (1955) e uma subestimativa para o método de Linacre (1993) em relação aos dados resultantes do método de Penman (1948).

As equações 5 e 6 (propostas por Kohler e Linacre, respectivamente) representam simplificações do método de Penman (1948). Em um estudo anterior realizado por Leitão et al. (2007) para as regiões de Boqueirão e Patos, foram identificados erros sistemáticos ao utilizar o método de Linacre, sugerindo que ajustes na formulação podem resultar em uma estimativa mais precisa da evaporação (E). Essas observações destacam a importância de considerar as características específicas do local e realizar ajustes adequados nos métodos simplificados para obter estimativas mais confiáveis da evaporação em diferentes contextos climáticos (Aghelpour et al., 2022; Kim et al., 2023; Ukkola et al., 2019).

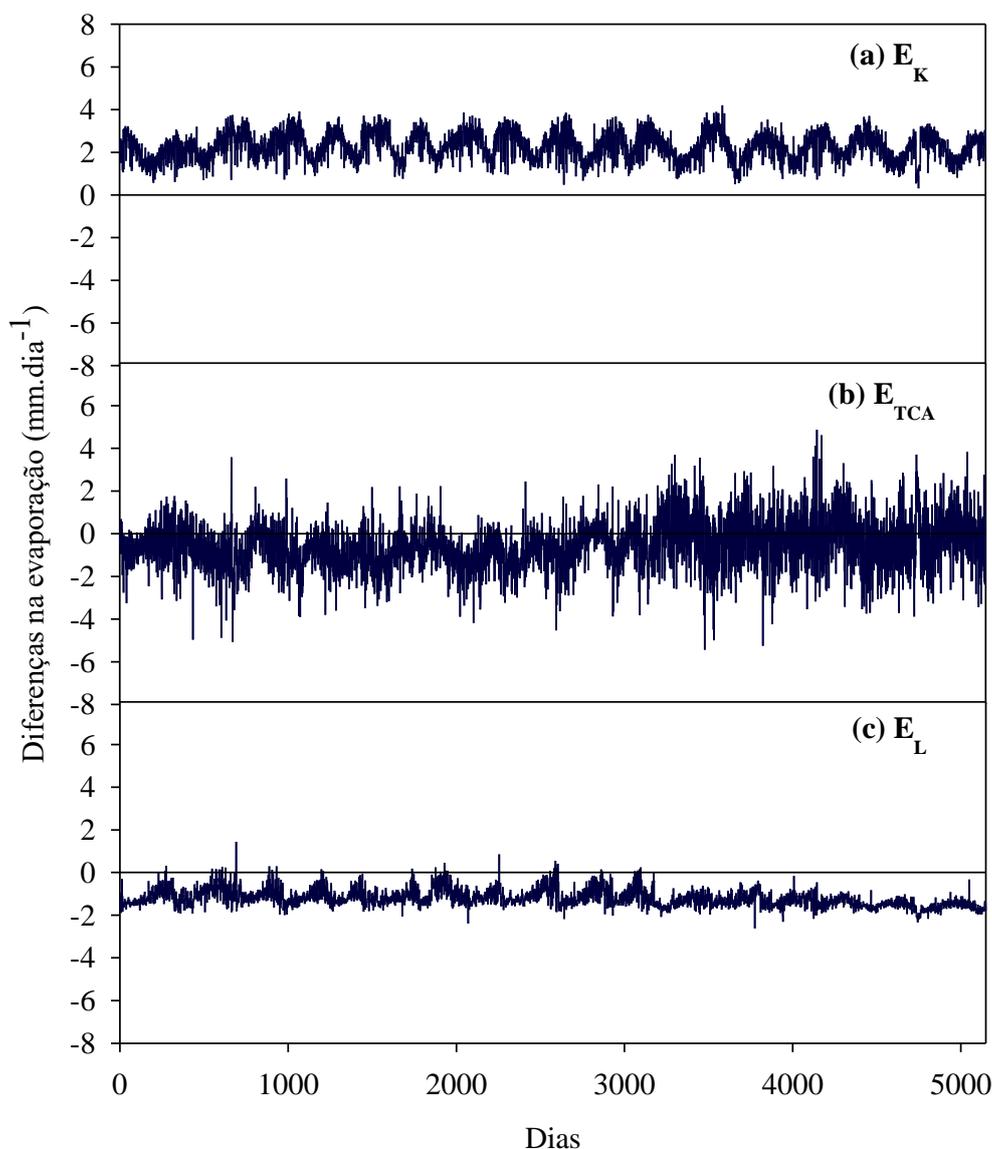


Figura 5. Diferenças no cálculo da evaporação diária pelos métodos de Kohler (E_K , a), Tanque Classe A (E_{TCA} , b) e Linacre (E_L , c) em relação ao método de Penman para o período de 1969-1999, Juazeiro-BA.

Neste estudo, quando correlacionados os dados de evaporação oriundos do TCA (E_{TCA}) e aqueles estimados pelos métodos de Linacre (1993) e Kohler (1955) em relação ao método padrão, foi possível identificar melhores ajustes para o E_L e E_K , respectivamente. Essa constatação ressalta a viabilidade e eficácia desses métodos simplificados na estimativa da evaporação em diversas condições climáticas, oferecendo opções valiosas para estudos hidrológicos e climatológicos. A Evaporação medida no Tanque Classe embora seja considerada um método simples e prático, como destacado por Bai e Guo (2023), foi aquele cujos valores do coeficiente de determinação mais se distanciaram da E_P ($R^2 = 0,51$) (Figura 6). É importante ressaltar que essa análise pode ser impactada pela escala de tempo estudada,

indicando a necessidade de considerar cuidadosamente esses aspectos ao interpretar os resultados.

O modelo de Linacre (1993) é uma alternativa simplificada que foi ajustada às condições de clima seco (Rodrigues et al., 2021) o que pode justificar sua adequação em condições próximas às analisadas. Em sua formulação, são utilizadas variáveis importantes na transferência de água entre a superfície e a atmosfera, como: temperatura do ar, velocidade do vento e radiação (Mohammadi et al., 2023). Wang et al. (2023) destacam que a modelagem da evaporação é um desafio sendo indispensável a consideração dos fatores que governam as trocas de água no ambiente (i.e. radiação, temperatura, umidade,

vento, bem como as características da superfície de evaporação).

Neste estudo, a E_K também apresentou boa correlação com os aqueles valores de evaporação

estimados pelo método de Penman (1948), demonstrando que tanto E_L quanto E_K , apresentam boa aproximação com método padrão (Althoff et al., 2019; Mohammadi et al., 2024).

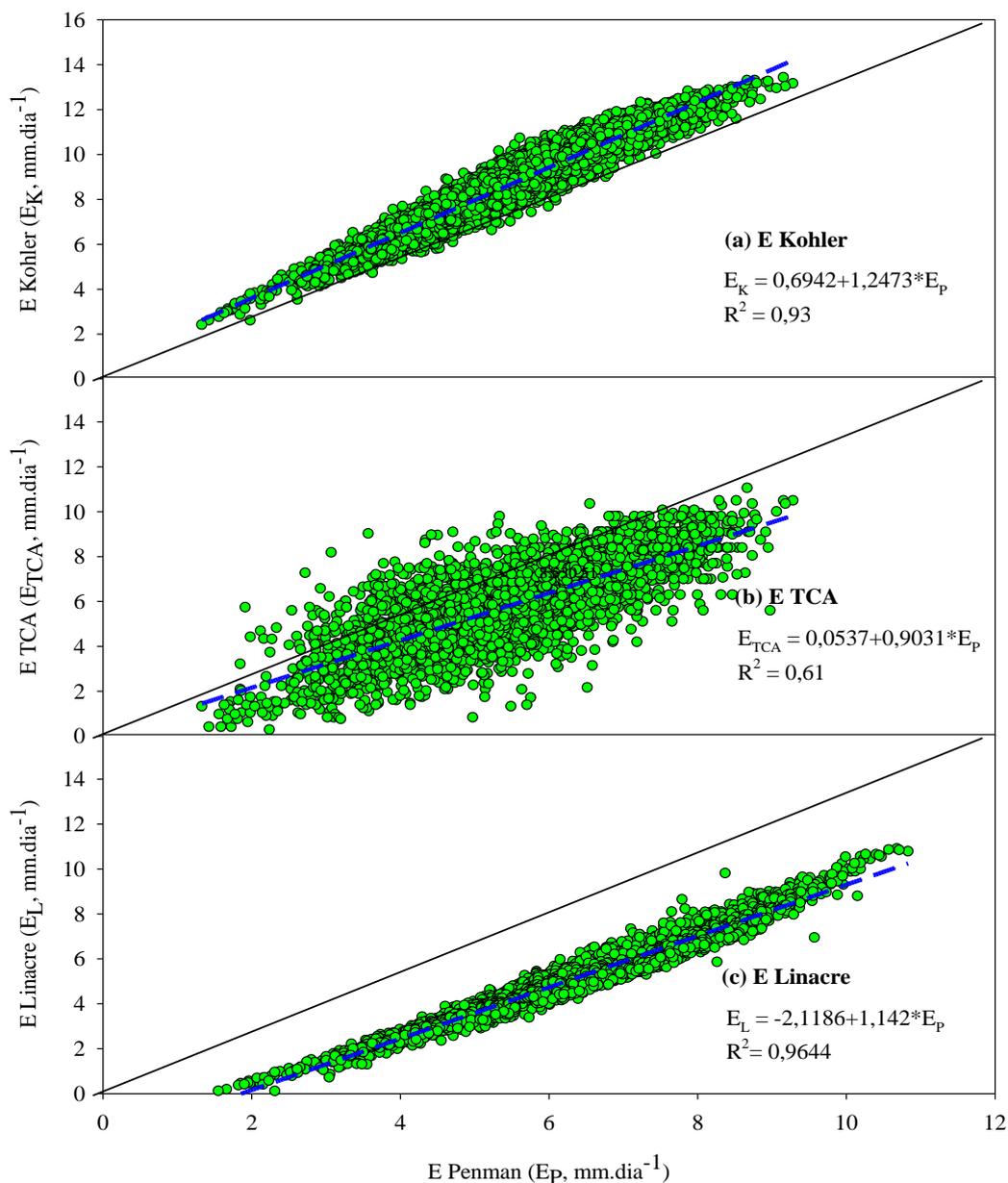


Figura 6. Correlação entre os valores de evaporação obtidos pelo Tanque Classe A (E_{TCA} , mm dia⁻¹) e os estimados pelos métodos de Kohler-1955 (E_K , mm dia⁻¹), e Linacre 1993 (E_L , mm dia⁻¹) em relação aos estimados pelo método de Penman-1948 (E_P , padrão).

Quando analisados em conjunto o coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância de Willmott (d) e o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (c) (Tabela 4), foi possível constatar que, embora os dados de E_L e E_K tenham apresentado forte correlação com a

E_P , houve uma maior disparidade em relação aos demais parâmetros analisados.

A E_K , resultou em um erro médio diário de 2,37 mm dia⁻¹, representando um desvio de 35% em relação a E_P . De mesmo modo, essa discrepância se manteve consistente nas análises de longo prazo, com um erro médio absoluto (EMA) de 2,28 mm dia⁻¹, apresentando um desempenho

mediano (Tabela 4). Esses resultados ressaltam a importância de considerar não apenas a correlação, mas também a precisão e a adequação dos modelos, especialmente em aplicações de curto prazo.

O método de Linacre (1993) apresentou um desempenho considerado “ótimo” ($c = 0,86$), o que pode estar associado as especificidades do modelo, conforme já relatado. Apesar disso, este método tendeu a ocasionar subestimativas médias de 19% nos valores da evaporação em longo prazo e superestimativas de curto prazo. Hussein (2022) analisando o desempenho do modelo de Linacre (1993) em relação ao de Penman também observaram superestimativas nos valores da E e

baixa correlação. Tal constatação pode estar relacionada ao fato de esta simplificação negligenciar a umidade em sua formulação, elemento este que apresenta grande relevância na determinação da perda de água pela superfície em regiões semiáridas (Hussein, 2022). Ou ainda, a necessidade de calibração local do modelo (Leitão et al., 2007).

Em comparação a E_P os dados de E_{TCA} foi classificado como “bom” e apesar de ter apresentado menor coeficiente de determinação, foi aquele que produziu uma menor discrepância em relação aos valores de longo prazo ($EMA = -0,57 \text{ mm.dia}^{-1}$, 8%) e de curto prazo (19%).

Tabela 4. Índices de desempenho: EMA – Erro médio absoluto, RMSE – Raiz do erro quadrático médio, R^2 = coeficiente de determinação, d – Índice de concordância de Willmott, r – coeficiente de correlação de Pearson, c – coeficiente de Camargo utilizados na comparação entre os valores de evaporação (E) obtidos pelo método de Penman (considerado padrão), medidos pelo Tanque Classe A (TCA) e os estimados pelos métodos de Kohler (1955), e Linacre (1993).

Índices	Kohler (1955)	TCA	Linacre (1993)
E	8,68	5,84	5,19
EMA	2,28	-0,57	-1,21
RMSE	2,37	1,23	1,27
R^2	0,93	0,61	0,96
d	0,64	0,85	0,88
r	0,96	0,78	0,98
c	0,62	0,67	0,86
Classificação	Mediano	Bom	Ótimo

Conclusões

Os valores de evaporação medidos pelo Tanque Classe "A" e estimados pela equação de Penman (1948) demonstraram uma maior sensibilidade ao déficit de pressão de vapor. Essa observação ressalta a influência significativa que esta variável exerce sobre o processo de evaporação em ambientes naturais, destacando a importância de considerar esse fator ao modelar e prever a evaporação em diferentes contextos climáticos.

A evaporação obtida pelo Tanque Classe A e estimada pelo método de Linacre (1993) apresentaram maior aproximação com aqueles obtidos modelo de Penman (1948), evidenciando a viabilidade desses métodos nas condições climáticas analisadas. Sugere-se que análises sejam

realizadas para identificar a adequação de diferentes métodos a escalas de tempo variadas.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE, IBPG-1184-2.01/22), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, 2023/05323-4) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa dos autores.

Referências

Aghelpour, P.; Bagheri-Khalili, Z.; Varshavian, V.; Mohammadi, B, 2022. Evaluating Three Supervised Machine Learning Algorithms (LM, BR, and SCG) for Daily Pan Evaporation

- Estimation in a Semi-Arid Region. *Water*, 14(21), Artigo 21. <https://doi.org/10.3390/w14213435>
- Althoff, D.; Rodrigues, L. N.; da Silva, D.D, 2019. Evaluating Evaporation Methods for Estimating Small Reservoir Water Surface Evaporation in the Brazilian Savannah. *Water*, v. 11, n. 9. <https://doi.org/10.3390/w11091942>
- Bai, P.; Guo, X, 2023. Development of a 60-year high-resolution water body evaporation dataset in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 334, n. 109428. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109428>
- Bosman, H. H, 1987. The influence of installation practices on evaporation from Symon's tank and American Class A-pan evaporimeters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 41(3), 307–323. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90086-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90086-4)
- Bozorgi, A.; Bozorg-Haddad, O.; Sima, S.; Loáiciga, H. A. 2021. Comparison of methods for estimating loss from water storage by evaporation and impacts on reservoir management. *Water and Environment Journal*, 35(1), 218–228. <https://doi.org/10.1111/wej.12620>
- Brito, A. P.de.; Wahnfried, I. D.; Ferreira, S. J. F.; Bastos, J. H. B. de, 2021. Análise comparativa entre métodos de estimativa de recarga para uma microbacia na Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus—AM. *Geologia USP. Série Científica*, v. 21, n.3, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-154769>
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C, 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89–97.
- Coelho, C. D.; Silva, D. D.; Sediya, G. C.; Moreira, M. C., Pereira, S. B.; Lana, A. M. Q, 2018. Estimates of monthly and annual evaporation rates and evaporated volumes per unit time in the Tucuruí-PA and Lajeado-TO hydroelectric power plant reservoirs based on different methods. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n. 1, p. 38-46. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p38-46/2018>
- Coutinho, E. R.; Madeira, J. G. F.; Silva, R. M. da.; Oliveira, E. M. de.; Delgado, A. R. S, 2020. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o) Diária Para Regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 649–657. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540069>
- Farias, C. F. de S.; José, J.V.; Leite, K. N.; Souza, M. D.; Amaral, M. A. C. M.; Silva, S. S. da, 2022. Mapeamento da interceptação de chuva na bacia hidrográfica do Alto Juruá, Acre. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24343>
- Figueiredo Filho, D. B.; Júnior, J. A. S, 2009. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, v. 18, 115-146.
- França, M. V. de.; Medeiros, R. M.; de, Holanda, R. M. de.; Saboya, L. M. F.; Neto, F. C. R.; Araújo, W. R. de, 2021. Análise da estimativa da evapotranspiração por diferentes modelos para Amparo de São Francisco – Sergipe. *Research, Society and Development*, v. 10 n. 13. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21505>
- Galvão, C.; Oliveira, G.; Leitão, M.; Leitao, T, 2005. Estimativa da Evaporação e Análise do Uso do Coeficiente (K_p) do Tanque CLASSE A nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 73–83. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p73-8>
- Gong, C.; Wang, W.; Zhang, Z.; Wang, H.; Luo, J.; Brunner, P, 2020. Comparison of field methods for estimating evaporation from bare soil using lysimeters in a semi-arid area. *Journal of Hydrology*, 590, 125334. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125334>
- Han, K. W.; Shi, K. B.; Yan, X. J.; Ling, F.; Hao, G. C.; Qin, Q. R, 2023. Estimating water surface evaporation losses under floating coverage: Modeling and Application. *Journal of Hydrology*, v. 626, n. 130252. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130252>
- Han, K. W.; Shi, K. B.; Yan, X. J.; Ouyang, J.; Lei, P.; Hao, G. C, 2022. Comparison of evaporation estimation methods for water surface under floating coverage in arid areas. *Agricultural Water Management*, v. 264, n. 107534. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107534>
- Hussein, M. M. A, 2022. Comparison between simplified and standardized Penman evaporation equation: Egyptian Mediterranean coast case study. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, v. 48, n. 4, p. 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.12.001>
- Jardim, A. M. R. F.; da Silva, M. V.; Silva, A. R.; dos Santos, A.; Pandorfi, H.; de Oliveira-Junior, J. F.; da Silva, T. G. F, 2021. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco state, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and*

- Solar-Terrestrial Physics, 223, 105733. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>
- Jardim, A. M. R. F.; Araújo Júnior, G. D. N.; Silva, M. V. D.; Santos, A. D.; Silva, J. L. B. D.; Pandorfi, H.; Silva, T. G. F., 2022. Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the caatinga biome of northeast Brazilian. *Remote Sensing*, 14(8), 1911. <https://doi.org/10.3390/rs14081911>
- Jerszurki, D.; de Souza, J. L. M.; Silva, L. de C. R., 2019. Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Climate Dynamics*, 53(1), 943–956. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>
- Kim, M. S.; Cha, D.; Lee, S. M.; Jeong, H.; Lee, C., 2023. Prediction of brine evaporation rate in a pond: Development of different models under controlled meteorological conditions and comparative evaluation. *Desalination*, 551, 116415. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116415>
- Kohler, M. A.; Noredenson, T. J.; Fox, W. E., 1955. Evaporation from pans and lakes. U. S. Weather Bureau Research. 21p. Paper 38.
- Legates, D. R.; McCabe Jr.; G. J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v. 35, n. 1, p. 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Leitão, M. de M. V. B. R.; Oliveira, G. M. de.; Leitão, T. J. V.; 2007. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 585–593.
- Li, S.; Wang, G.; Chai, Y.; Miao, L.; Fifi Tawia Hagan, D.; Sun, S.; Huang, J.; Su, B.; Jiang, T.; Chen, T.; Lu, C.; Guan, Z., 2023. Increasing vapor pressure deficit accelerates land drying. *Journal of Hydrology*, 625, 130062. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130062>
- Linacre, E. T., 1993. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 64, n. 3-4, p. 237-256
- Masiero, E.; Oliveira, D. K.; Costa, O. P. da.; Vecchia, F. A. da. S., 2020. Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 151–173. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200393>
- Mekoya, A., 2021. Comparison of Evaporation Schemes and Methods of Estimation of Class A Pan Coefficient at Tharandt, Germany. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s41101-020-00099-1>
- Mesquita, J. B. de F.; Lima Neto, I. E.; Raabe, A.; de Araújo, J. C., 2020. The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. *Journal of Hydrology*, v. 590, n. 125456. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>
- Mohammadi, M.; Salarijazi, M.; Ghorbani, K.; Dehghani, A.-A., 2023. Improvement of daily pan-evaporation calculation in arid and semi-arid regions by limited climatic data. *Journal of Water and Climate Change*, v. 15, n. 2, p. 305–324. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.459>
- Mohammadi, M.; Salarijazi, M.; Ghorbani, K.; Dehghani, A.-A., (2024). More reliable determination of daily evaporation from the pan in cold regions by limited meteorological factors. *Applied Water Science*, v. 14, n. 3, p. 52. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02100-x>
- Monteiro, A. S. C.; Silva, E. L. da.; Silva, R. R. M.; Alves, J. do. P. H., 2021. Mecanismos que controlam as características das águas dos reservatórios do estado de Sergipe, Nordeste do Brasil. *Scientia Plena*, v. 17, n. 01. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.011701>
- Monicelli, F.; Rocha Junior, C. A. N. da.; Lima, S.; Diniz, I. S. M.; Becker, V., 2023. Trophic state in Brazilian semiarid reservoirs after reflooding. *RBRH*, 28, e37. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230070>
- Oliveira, P. A.; Santos, V. S.; Curi, R. C.; Carvalho, J. R. M., 2019. Redução de evaporação de água: estudo de caso no reservatório de São Gonçalo/PB, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v.10, n. 5. <http://dx.doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.005.0018>
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of Royal Society-Series A, London*, v.193, n.1, p.120 145. <https://doi.org/10.1098/RSPA.1948.0037>
- Pereira, S. B., 2004. Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 105p.
- Rodrigues, I. S.; Costa, C. A. G.; Raabe, A.; Medeiros, P. H. A.; de Araújo, J. C., 2021. Evaporation in Brazilian dryland reservoirs: Spatial variability and impact of riparian

- vegetation. *Science of The Total Environment*, v. 797, n. 149059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149059>
- Sanches, F. de. O.; Frauches, M. da. S.; Ferreira, C. de. C. M.; Vianna, Y. C. G.; Oliveira, T. A., 2023. Evaporação em reservatórios hídricos: uma revisão de métodos/técnicas empíricas. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 43, p. e209203–e209203. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.209203>.
- Santos, B. C. dos.; Resende, L. A. C.; Souza, P. H. de, 2017. Análise da taxa de evaporação d'água em tanques “classe A”—Um estudo de caso no contexto das metrópoles do sudeste brasileiro. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, 1, 2315–2328. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2586>
- Santos, T. V. dos.; Amorim, R. F. C. de.; Barbosa, H. A.; Silva, F. D. dos S.; 2021. Estimativa da Evapotranspiração na Mesorregião do Baixo São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, 981–993. <https://doi.org/10.1590/0102-77863550023>
- Silva, J.; Souza, E.; Souza, R.; Santos, E.; Antonino, A, 2019. Efeito De Diferentes Usos Do Solo Na Erosão Hídrica em Região Semiárida. *Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG*, v 27, 272–283. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i3.867>
- Souza, V. Q. D.; Gomes, M. D. D. A.; Carmo, A. P. M. D.; Silva, F. L. D.; Silva, M. B. P. D.; Freitas, L. D. S, 2022. Desempenho de Modelos para Estimativa da Evapotranspiração de Referência Na Microrregião De Tomé Açú-Pa. *IRRIGA*, v. 27 n. 1. <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n1p155-167>
- Teixeira Filho, A. D. J.; Goés Barbosa, J. V.; Cavalcante Ferreira, J. C, 2023. Avaliação do Desempenho de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para o Município de Manicoré, Amazonas. | *Revista IRRIGA - Brazilian Journal of Irrigation & Drainage* EBSCOhost. <https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n1p60-76>
- Ukkola, A. M.; Roderick, M. L.; Barker, A.; Pitman, A. J, 2019. Exploring the stationarity of Australian temperature, precipitation and pan evaporation records over the last century. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab545c>
- Uliana, E. M.; Aires, U. R. V.; Sousa Junior, M. F. de.; Silva, D. D. da.; Moreira, M. C.; Cruz, I. F. da.; Araujo, H. B, 2024. Estimated evaporation of lakes by climate reanalysis data and artificial neural networks. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 136, n. 104811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104811>
- Vieira, N. P. A.; Pereira, S. B.; Martinez, M. A.; Silva, D. D.; Silva, F. B, 2016. Estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias usando diferentes modelos. *Engenharia Agrícola*, v.36, n. 3, p. 433-448. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p433-448/2016>
- Wang, H.; Sun, F.; Liu, F.; Wang, T.; Liu, W.; Feng, Y, 2023. Reconstruction of the pan evaporation based on meteorological factors with machine learning method over China. *Agricultural Water Management*, v. 287, n. 108416. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108416>
- Wen, R.; Qin, M.; Jiang, P.; Yang, F.; Liu, B.; Zhu, M.; Fang, Y.; Tian, Y.; Shang, B, 2024. Vegetation and Evapotranspiration Responses to Increased Atmospheric Vapor Pressure Deficit across the Global Forest. *Atmosphere*, 15(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.3390/atmos15040408>
- Wijaya, D. D.; Putri, N. S. E.; Utama, A. K.; Wibowo, S. T.; Sadarviana, V, 2024. Determination and assessment of GNSS-derived precipitable water vapor in Indonesia using Ina-CORS. *Advances in Space Research*, 73(1), 386–403. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.048>
- Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; David, R. L.; Donnell, J. O.; Rowe, C. M, 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995–9005. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>