

DIFERENÇAS NA SOMA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA HORÁRIA E DIÁRIA PARA A REGIÃO DO CARIRI CEARENSE

Jaqueline de Melo Santos Silva¹, Sirleide Maria de Menezes², Ana Célia Maia Meireles³, Carlos Wagner Oliveira³, José Nilton de Araújo Junior⁴, José Lucas dos Santos Souza⁴

RESUMO: A evapotranspiração (ET) é um processo essencial para o manejo hídrico, principalmente em regiões semiáridas. Portanto, este estudo teve como objetivo comparar as estimativas de evapotranspiração de referência (ET_o) diária e horária, utilizando o método FAO Penman-Monteith, com dados da estação meteorológica da UFCA de 2024. Os resultados mostraram que a ET_o horária foi superior à diária durante todo o ano, especialmente nos meses secos, indicando que o método diário pode subestimar a demanda real de água. A baixa correlação entre os métodos ($R^2 = 0,15$) e os valores do erro evidenciam essa diferença. A velocidade do vento foi a variável meteorológica que mais influenciou a variação entre as estimativas. Concluiu-se que a ET_o horária é mais precisa para representar as condições reais do ambiente, sendo mais adequada para o manejo da irrigação em regiões com alta variabilidade climática, como o Cariri cearense.

PALAVRAS-CHAVE: Evaporação; Clima; Irrigação.

DIFFERENCES IN THE SUM OF HOURLY AND DAILY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE CARIRI CEARENSE REGION

ABSTRACT: Evapotranspiration (ET) is an essential process for water management, especially in semi-arid regions, therefore this study aimed to compare daily and hourly reference evapotranspiration (ET_o) estimates, using the FAO Penman-Monteith method, with data from the UFCA meteorological station in 2024. The results showed that hourly ET_o was

¹ Discente de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA) Campus Crato, CEP: 63130-025, Crato, CE, Brasil. Fone (88) 998461584. e-mail: Jaqueline.melo@aluno.ufca.edu.br.

² Pós-Doutoranda, PRODER, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA) Campus Crato, CEP: 63130-025, Crato, CE, Brasil.

³ Prof. Doutor(a), Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA) Campus Crato, rua Ícaro de Sousa Moreira, 126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato – CE, Brasil.

⁴ Discente de agronomia, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA) Campus Crato, rua Ícaro de Sousa Moreira, 126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato – CE, Brasil.

higher than daily ETo throughout the year, especially in the dry months, indicating that the daily method may underestimate real demand of water. The low correlation between the methods ($R^2 = 0.15$) and the error values highlight this difference. Wind speed was the meteorological variable that most influenced the variation between estimates. It is concluded that the hourly ETo is more accurate to represent real environmental conditions, being more suitable for irrigation management in regions with high climate variability, such as Cariri in Ceará.

KEYWORDS: Evaporation; Climate; Irrigation.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um processo fundamental no ciclo hidrológico, representando a transferência de água da superfície terrestre para a atmosfera por meio da evaporação e transpiração das plantas e está sendo amplamente empregada como parâmetro para a avaliação da demanda hídrica em diversas áreas do conhecimento, incluindo ecologia, meteorologia, agronomia e hidrologia (Allen et al., 1998; Awal et al., 2020; Xiang et al., 2020). A quantificação da evapotranspiração é essencial para garantir uma gestão eficiente dos recursos hídricos, especialmente em regiões secas como o semiárido.

A estimativa da evapotranspiração direta é demorada e com um elevado custo (Bakhtiari et al. 2017), com isso outros métodos indiretos estão amplamente sendo utilizados com variáveis meteorológicas, mas muito se vem discutindo na literatura científica sobre se essas variáveis são precisas e o efeito na ET (Al Mamun et al., 2024). Diferentes métodos podem ser usados para calcular a evapotranspiração, principalmente devido aos avanços tecnológicos e a maior disponibilidade de estações meteorológicas automáticas, tornando viável a obtenção de dados meteorológicos em alta resolução temporal, permitindo estimativas mais detalhadas da evapotranspiração em intervalos horários.

A equação de Penman-Monteith, recomendada pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), é um dos métodos mais utilizados para estimar a evapotranspiração de referência (ETo). Sua aplicação pode ser realizada em diferentes escalas temporais, como intervalos mensais, diários e horários. Segundo Ortega-Farias et al. (1995) a determinação da ETo calculada em intervalos horários pode ser mais representativa das condições reais do ambiente do que a ETo mensais ou diárias, especialmente em locais onde há grande variação nas condições meteorológicas ao longo do dia. Alth-off et al. (2019), evidencia também sobre a melhor precisão de dados, além de fornecer opções mais eficazes para o

planejamento e a gestão dos recursos hídricos e do solo. Santos et al. (2021) realizou uma comparação da soma horária e a ETo diária, identificando uma diferença média de 5,1% a 7,4% entre a evapotranspiração de referência (ETo) diária e a soma da ETo horária. Com base nesses resultados, recomendaram que a soma horária apresenta um potencial significativo para aplicação na engenharia.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo calcular com base de dados da estação meteorológica as estimativas de evapotranspiração de referência obtidas em intervalos horários, analisando suas diferenças e implicações para o manejo da água na agricultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos a partir da Estação Meteorológica Automática da Universidade Federal do Cariri (UFCA), localizada nas coordenadas de 7°14' S e 39°22' O, a uma altitude de aproximadamente 423 metros acima do nível do mar. A região apresenta um clima semiárido, caracterizado por um índice pluviométrico médio anual de aproximadamente 1090 mm, com uma concentração de chuvas principalmente nos meses de janeiro a maio, o que influencia diretamente os processos hidrológicos e a disponibilidade hídrica local. A temperatura média do ar na área varia entre 24°C e 26°C ao longo do ano (Alcântara et al. 2025).

A evapotranspiração de referência diária e horária (ETo) foi calculada com base no método FAO 56 Penman-Monteith (PM), considerado um dos procedimentos mais precisos e amplamente utilizados para estimar a evapotranspiração de referência, devido à sua capacidade de integrar diversos fatores climáticos relevantes (Allen et al., 1998).

$$ET_{o,d} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T_a + 273))u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Onde $ET_{o,d}$ é a ET calculada diariamente; R_n é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G é a densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_a é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (ms^{-1}); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão de vapor real (kPa); $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor de saturação (kPa); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A equação PM da FAO para intervalos de tempo horários é:

$$ET_{o,h} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(37/(T_h + 273))u_2(e^{\circ}(T_h) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

Onde T_h ¼ temperatura média horária do ar (°C); e $e^{\circ}(T_h)$ é a pressão de vapor de saturação na temperatura do ar T_h (kPa). As etapas envolvidas no cálculo da evapotranspiração de referência diária e horária (ET_o) são fornecidas pelo material complementar e foi retirado do manual FAO-56. Os cálculos foram realizados para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2024, utilizando-se dados meteorológicos diários coletados pela estação, incluindo radiação solar global (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹), temperaturas média, máxima e mínima do ar ($T_{méd}$, $T_{máx}$ e $T_{mín}$, em °C), umidade relativa do ar (UR, em %) e velocidade do vento (u , m s⁻¹).

Para avaliar a precisão dos valores de evapotranspiração estimados por diferentes procedimentos, realizaram-se análises estatísticas comparativas. Foram utilizados indicadores como o coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variabilidade dos dados observados; o erro quadrático médio (RMSE), que fornece uma medida da dispersão dos erros de previsão; e o erro médio (EM), que indica a tendência de superestimar ou subestimar os valores estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, apresenta-se a distribuição temporal da evapotranspiração diária ($ET_{oDiária}$) e da soma horária ($ET_{oHorária}$) ao longo do período de estudo. A Figura 1A evidencia que as estimativas de ET_o variaram ao longo do ano, refletindo as variações sazonais e climáticas típicas da região. Observa-se que, os valores de ET_{oH} foram superiores aos de ET_{oD} durante todo o período analisado, com diferenças mais acentuadas nos meses de maior demanda evaporativa, especialmente entre agosto e dezembro.

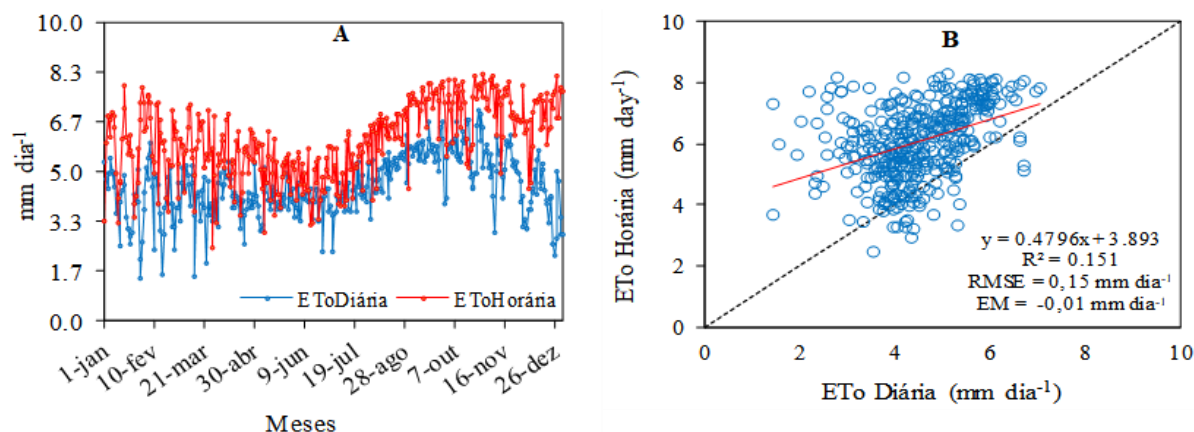


Figura 1. Distribuição temporal da evapotranspiração diária (EToDiária) e da soma horária (EToHorária) (A), e dispersão entre os dados de EToDiária e EToHorária (B). A linha vermelha representa o modelo linear ajustado.

Essas variações podem ser atribuídas à maior sensibilidade do método horário na captação das flutuações diurnas das variáveis climáticas. Segundo estudos como o de Yetbarek et al. (2024), essa discrepância ocorre porque a EToH tem a capacidade de captar as variações intradiárias mais precisas, já que considera dados horários, enquanto a EToD utiliza apenas valores médios diários, que podem mascarar picos de radiação solar, temperaturas elevadas ou ventos fortes que ocorrem em determinados momentos do dia. Assim, a EToH tende a refletir uma demanda evaporativa mais realista, especialmente em condições de clima mais variável, como as observadas na região estudada.

Durante os meses mais secos, de agosto a dezembro, essa tendência de aumento na diferença entre as estimativas foi bastante evidente. Observou-se que a EToD frequentemente subestimou a demanda evaporativa real do ambiente, uma constatação encontrada na literatura corroboram com os resultados onde, Djaman et al. (2018) relataram que, em condições de clima seco e quente, os métodos baseados em médias diárias tendem a subestimar a evapotranspiração, uma vez que não captam adequadamente os picos de radiação solar e as temperaturas elevadas que ocorrem ao longo do dia. Essa subestimação pode impactar significativamente as práticas de manejo hídrico, levando à insuficiência de irrigação ou à má avaliação da necessidade de água das culturas.

A Figura 1B apresenta a análise de regressão entre os valores de EToEstimados pelo método diário (EToD) e pelo método horário (EToH), possibilitando uma avaliação comparativa entre essas duas estimativas ao longo do período de estudo. A linha de regressão traçada, que se encontra paralela e acima da linha de referência 1:1 (reta de identidade), evidencia que, de modo geral, os valores de EToH tendem a ser superiores aos de EToD, indicando uma tendência de subestimativa por parte do método diário.

O coeficiente de determinação (R^2) de apenas 0,15 reforça essa baixa correlação entre as duas estimativas, mostrando que há uma grande dispersão dos dados e uma fraca relação linear entre EToD e EToH. Essa baixa correlação sugere que os métodos diferem significativamente na representação da demanda evaporativa ao longo do tempo, especialmente em condições de maior variabilidade climática, como ocorre em períodos secos e com altas temperaturas.

Apesar de os índices de erro, como o erro quadrático médio (RMSE) de $0,15 \text{ mm dia}^{-1}$ e o erro médio (EM) de $-0,01 \text{ mm dia}^{-1}$, não apresentarem valores extremamente elevados, eles ainda indicam uma tendência consistente de subestimativa por parte do método diário em relação à estimativa horária. O RMSE relativamente baixo aponta que, embora as diferenças entre os métodos possam não ser extremamente grandes em termos absolutos, elas são sistemáticas e relevantes do ponto de vista da precisão. Esse comportamento de subestimação pode ser atribuído à variabilidade das condições meteorológicas ao longo do dia, que não são bem captadas por médias diárias.

Na Figura 2, apresenta-se uma análise detalhada da influência do desvio padrão diário das principais variáveis meteorológicas: temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, na diferença entre as estimativas de evapotranspiração diária (EToD) e horária (EToH). Essa abordagem visa compreender de que forma as variações diárias dessas variáveis influenciam as discrepâncias observadas entre os dois métodos de estimativa da evapotranspiração, ressaltando possíveis fatores que podem contribuir para a subestimação ou superestimação de valores em cada método. De acordo com os coeficientes de determinação (R^2) apresentados, os resultados indicam que a variável que mais influencia essa diferença é a velocidade do vento (Figura 2D), seguida pela umidade do ar (Figura 2B), enquanto a temperatura (Figura 2A) e a radiação solar (Figura 2C) apresentam menor, mas ainda relevante, impacto. Esses resultados sugerem que as variações na velocidade do vento desempenham um papel predominante na diferença entre as estimativas de evapotranspiração diária e horária, possivelmente devido ao seu efeito direto na taxa de evaporação e na dispersão de vapor de água no ambiente.

A maior influência da velocidade do vento pode ser atribuída ao seu impacto na taxa de evaporação, uma vez que ventos mais fortes aumentam a perda de água por evapotranspiração ao remover a umidade da camada de ar próxima à superfície da planta ou solo, intensificando o processo de evaporação. Assim, variações diárias na velocidade do vento podem gerar mudanças significativas na demanda evaporativa que, se não forem captadas adequadamente pelos métodos diários, podem levar a uma subestimação dos valores reais, como sugerem os resultados.

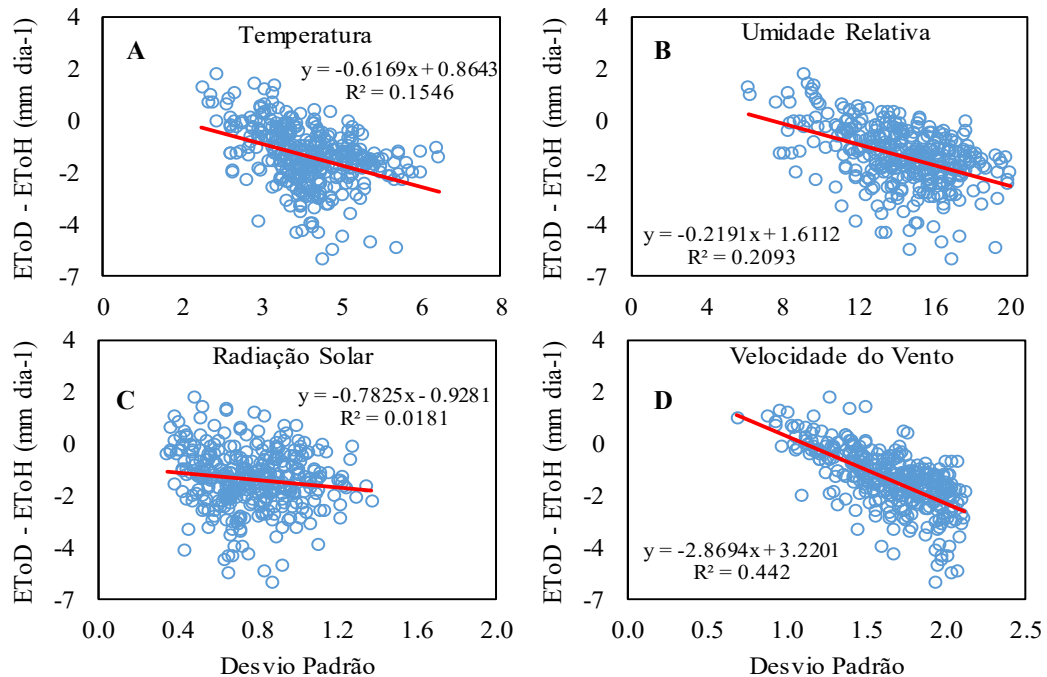


Figura 2. Influência do desvio padrão diário das variáveis meteorológicas na diferença entre as estimativas da ETo Diária e ETo Horária (EToD - EToH). A linha vermelha representa o modelo linear ajustado.

No entanto, os resultados obtidos até aqui sugerem a importância de aprofundar essa análise, considerando as diferentes condições climáticas ao longo do ano. Seria, por exemplo, interessante dividir o período de estudo em estações chuvosas e secas, para verificar se a influência de cada variável apresenta variações significativas de acordo com o momento do ciclo anual. Essa abordagem poderia revelar que, durante a estação seca, fatores como velocidade do vento e radiação solar tenham maior peso na variação da diferença entre as estimativas, enquanto na estação chuvosa, a umidade do ar possa exercer maior influência.

Essa análise mais detalhada por estações do ano permitiria compreender melhor os mecanismos que governam a evaporação em diferentes condições ambientais e, assim, aprimorar os modelos de estimativa de ETo, tornando-os mais sensíveis às variabilidades sazonais. Além disso, esses dados poderiam orientar estratégias de manejo hídrico mais eficazes, ajustando as estimativas de demanda evaporativa de acordo com as mudanças climáticas ao longo do ano, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos na região estudada (Yetbarek et al. 2022).

Na Figura 3, é possível observar um padrão típico de variação diária na variável analisada, evidenciando comportamentos recorrentes ao longo de um ciclo de 24 horas. Os valores mais baixos ocorrem durante a noite, geralmente nas horas após o pôr do sol até o começo da madrugada, refletindo a ausência de radiação solar e, conseqüentemente, a redução na energia disponível para processos como a evapotranspiração ou aquecimento do ar. Essa diminuição

dos valores noturnos está relacionada à queda na temperatura do ar e à menor radiação incidente, fatores que limitam a taxa de evaporação e outros processos sensíveis à energia solar.

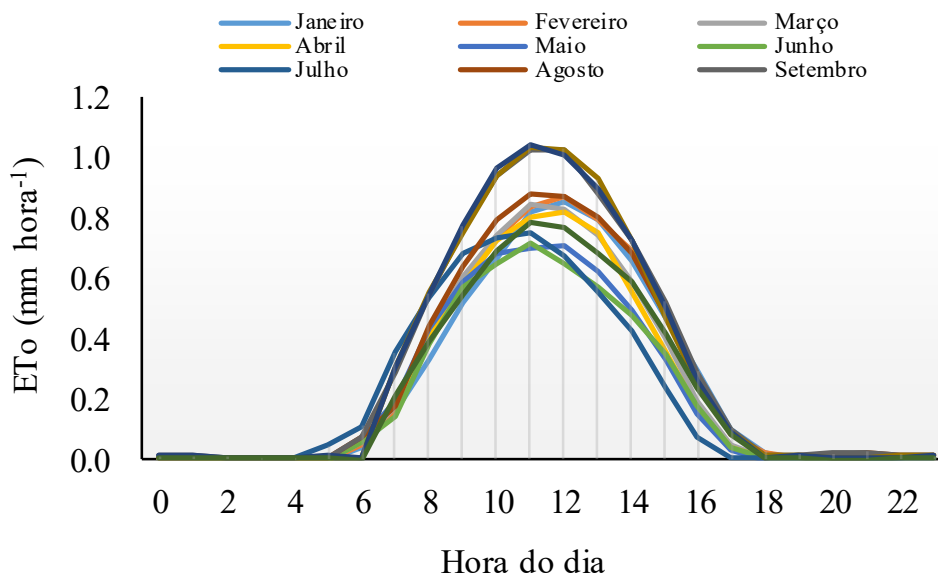


Figura 3. Média da evapotranspiração de referência (ETo) horária para cada mês.

Por outro lado, os picos mais elevados aparecem nas horas centrais do dia, aproximadamente entre 10h e 14h, momento em que a radiação solar atinge seu ponto máximo devido ao ângulo de incidência mais direto do sol. Nesse período, há um aumento significativo na energia disponível, elevando a temperatura do ar e estimulando a evaporação, que atingem seus valores máximos. Além disso, a combinação de radiação solar intensa e temperaturas elevadas favorece o aumento da taxa de evapotranspiração, refletindo-se nos picos observados na curva.

Os meses de julho, agosto e setembro apresentaram os maiores valores de ETo nas horas de pico, ultrapassando $1,0 \text{ mm h}^{-1}$, indicando maior demanda evaporativa nesse período. Isso está possivelmente associado a menores níveis de umidade relativa do ar e maior incidência solar, comuns na estação seca. Em contraste, os meses de março, abril e maio mostraram valores ligeiramente inferiores de ETo ao longo do dia, com picos próximos a $0,8 \text{ mm h}^{-1}$, refletindo uma menor demanda evaporativa. Sendo esses resultados possivelmente devido, a umidade mais elevada ou redução da radiação solar por cobertura de nuvens nesse período, que também coincide com os meses de chuvas nesta região.

CONCLUSÕES

O estudo evidenciou que a estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) realizada em intervalos horários apresenta valores superiores aos obtidos por meio de estimativas diárias, especialmente nos meses secos de agosto a dezembro, período no qual as condições ambientais apresentam maior variabilidade. Essa diferença ocorre porque a ET_o horária é mais sensível às flutuações das variáveis meteorológicas ao longo do dia, captando de forma mais precisa os picos de radiação solar, temperatura e vento que influenciam diretamente o processo de evapotranspiração.

A análise das variáveis meteorológicas revelou que a velocidade do vento foi a principal responsável pelas diferenças observadas entre os dois métodos, uma vez que ventos mais intensos aumentam a perda de água por evaporação, e suas variações ao longo do dia não são bem representadas pelas médias diárias. Dessa forma, a estimativa horária demonstra-se mais adequada para regiões com alta variabilidade climática, como o Cariri Cearense, proporcionando uma avaliação mais precisa da demanda hídrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa LEMGE (Laboratório de Estatística, Modelagem e Geoprocessamento) e a Universidade Federal do Cariri (CCAB/UFCA, Crato, CE) pelo apoio, orientação e logística na realização dos trabalhos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas participantes desta pesquisa e ao PROJETO: Edital n.162022, PDPG – Pós-doutorado Estratégico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al MAMUN, M. A., SARKER, M. R., SARKAR, M. A. R., ROY, S. K., NIHAD, S. A. I., MCKENZIE, A. M., HOSSAIN, M. I. & KABIR, M. S. 2024 Identification of influential weather parameters and seasonal drought prediction in Bangladesh using machine learning algorithm. **Scientific Reports** 14 (1), 566.

ALCÂNTARA, A. R. M., MEIRELES, A. C. M., XENOFONTE, J. C. C., DE MENEZES, S. M., CARNEIRO, A. A. C., OLIVEIRA, C. W. & BRASIL, J. B. (2025). Reference

evapotranspiration estimated with limited climate data compared with alternative models in the semi-arid region. **Revista brasileira de agricultura irrigada-rbai**, 19(1), 17-23.

ALLEN R. G., JENSEN MEU, WRIGHT J. L. & BIRMANÊS RD 1989 Estimativas operacionais da evapotranspiração de referência. **Revista de Agronomia** 81,650–662.

ALTHOFF, D., FILGUEIRAS, R., DIAS, S. H. B. & RODRIGUES, L. N. 2019. Impact of sum-of-hourly and daily timesteps in the computations of reference evapotranspiration across the Brazilian territory. **Agricultural Water Management** 226, 105785.

AWAL, R.; HABIBI, H.; FARES, A.; DEB, S. Estimating reference crop evapotranspiration under limited climate data in West Texas. **Journal of Hydrology: Regional Studies, Lubbock**, v. 28, p. 100677, 2020.

BAKHTIARI, B., KHANJANI, M. J. & FADAEI-KERMANI, E. 2017 Differentiation of computed sum of hourly and daily reference evapotranspiration in a semi-arid climate. **Journal of Applied Research in Water and Wastewater** 4 (2), 358–362.

DJAMAN, K., IRMAK, S., SALL, M., SOW, A. & KABENGE, I. 2018a Comparison of sum-of-hourly and daily time step standardized ASCE Penman–Monteith reference evapotranspiration. **Theoretical and Applied Climatology** 134, 533–543.

ORTEGA-FARIAS, S. O., CUENCA, R. H. & ENGLISH, M. 1995 Hourly grass evapotranspiration in modified maritime environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 121, 369–373.

SANTOS, A., DE SOUZA, J. L. M. & ROSA, S. L. K. 2021 Hourly and daily reference evapotranspiration with ASCE-PM model for Paraná State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia** 36 (2), 197–209.

XIANG, K., LI, Y., HORTON, R., FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review. **Agricultural Water Management, Yangling Shaanxi**, v. 232, p. 106043, 2020.

YETBAREK, E., VASHISHTH, N., OJHA, R. Differences in sum-of-hourly and daily reference evapotranspiration for a rice–wheat cropping system in Ganga Basin, India. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 6, p. 2845-2862, 2024.

YETBAREK, E; OJHA, R. Differences in Sum-of-Hourly and Daily Reference Evapotranspiration for a Rice-Wheat Cropping System in Ganga Basin, India. **Authorea Preprints**, 2022.