



I CONGRESSO PERNAMBUCANO DE RECURSOS HÍDRICOS

Água para o Desenvolvimento
Recife, 24, 25 e 26 de Março de 2026

ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM AMBIENTE URBANO TROPICAL DURANTE EVENTO EXTREMO DE CHUVA A PARTIR DO MODELO ESTIMET

Cinthia Maria de Abreu Claudino¹; Eduardo Gonçalves Patriota², Vanine Elane Menezes de Farias³; Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁴; Cristiano das Neves Almeida⁵ & Victor Hugo Rabelo Coelho⁶.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Sensoriamento Remoto; Eventos Extremos; Recife.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração real (ET) é o principal componente de saída do balanço hídrico terrestre, a qual é essencial para a regulação dos ciclos hidrológico, energético e do carbono. Sua estimativa precisa é crucial para a modelagem hidrológica, o monitoramento ambiental e a gestão sustentável da água, especialmente em regiões tropicais (Ahamad et al., 2022). Nesse cenário, o sensoriamento remoto destaca-se na estimativa regional da ET, com produtos globais como o MOD16, baseado no método de Penman–Monteith. Contudo, limitações de parametrização, resolução espacial, interferência de nuvens e alta latência temporal dificultam seu uso em análises locais e em monitoramento quase em tempo real em regiões tropicais (Laipelt et al., 2021).

Para superar essas limitações, foi desenvolvido o modelo ESTIMET, que estima a ET diária quase em tempo real, com maior resolução espacial (250 m) e menor influência da cobertura de nuvens. As estimativas contínuas e de baixa latência fornecidas por esse modelo permitem análises mais robustas de tendências e da relação da ET com variáveis climáticas e biofísicas em diferentes biomas brasileiros, ampliando sua aplicação em hidrologia, agricultura e gestão dos recursos hídricos (Claudino et al., 2025).

As estimativas contínuas e distribuídas de ET fornecidas pelo ESTIMET permitem identificar tendências e relacionar esse componente-chave do balanço hídrico a variáveis climáticas regionais, aspecto reforçado pela ocorrência recente de eventos extremos. As chuvas intensas de maio de 2022 em Recife, com volumes excepcionais concentrados em curto período, resultaram em graves impactos socioambientais e evidenciaram a alta vulnerabilidade da cidade às mudanças climáticas, destacando a necessidade de monitoramento hidrometeorológico eficiente (Marengo et al., 2023).

Nesse contexto, a análise da variabilidade da evapotranspiração durante eventos extremos é estratégica para o planejamento urbano e a gestão adaptativa de riscos. Assim, este estudo analisa as estimativas de evapotranspiração em Recife durante um evento extremo, utilizando o modelo ESTIMET, visando compreender os impactos hidrológicos de eventos climáticos extremos em áreas urbanas tropicais.

¹) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 999618-9626, cinthiamariaac@gmail.com.

²) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99655-3877, edugoncalvespatriota@gmail.

³) Universidade de São Paulo, São Paulo, (83) 98732-9645, vaninemenezesf@gmail.com.

⁴) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, suzanam.ufpe@gmail.com.

⁵) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 99349-0880, almeida74br@yahoo.com.br

⁶) Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, (83) 98886-1663, victor.coelho@academico.ufpb.br.

METODOLOGIA

Área de estudo

Recife é uma cidade costeira localizada em planície flúvio-marinha de baixa altitude, com extensa rede hídrica associada às bacias dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió (ICLEI, 2020). O município possui uma área territorial de aproximadamente 218,84 km² e uma população estimada em cerca de 1,49 milhão de habitantes, o que resulta em elevada densidade demográfica (6.803,60 hab/km²) (IBGE, 2022). Está situada no bioma mata atlântica e possui o clima Clima Tropical de Monção (Ama), segundo a classificação climática de Köppen–Geiger, com médias anuais superiores a 25 °C e período chuvoso entre abril e agosto (APAC, 2023).

Processamento dos dados

O modelo ESTIMET, baseado na equação de Penman–Monteith (Monteith, 1965), utiliza dados de sensoriamento remoto orbital, derivados de reflectância da superfície, combinados com informações auxiliares, e estima a densidade do fluxo de calor latente, a partir da qual é calculada a evapotranspiração diária total (ET; mm), considerando a soma dos componentes de evaporação da superfície úmida do dossel, transpiração da vegetação sob condições de dossel seco e evaporação do solo (Running et al., 2017).

Para mitigar os efeitos da cobertura de nuvens nas estimativas diárias de ET, parâmetros biofísicos de entrada, como índice de área foliar (IAF), EVI2 e albedo da superfície, foram assumidos como constantes dentro de cada mês, a partir da seleção dos melhores pixels livres de nuvens, extraídos de até oito imagens MODIS de reflectância disponíveis mensalmente. O modelo também foi aprimorado por meio da incorporação de mapas regionais de uso e cobertura da terra do MapBiomas, permitindo melhor parametrização da condutância do dossel e da transpiração vegetal em escala nacional.

Outra melhoria relevante consistiu na utilização de dados meteorológicos de reanálise com resolução espacial mais elevada, incluindo produtos como ERA5 (ECMWF Climate Reanalysis) e GLDAS (Global Land Data Assimilation System), contemplando variáveis como umidade relativa do ar, radiação de onda curta e pressão atmosférica. Todo o desenvolvimento e processamento do modelo ESTIMET foram realizados na plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando programação em JavaScript.

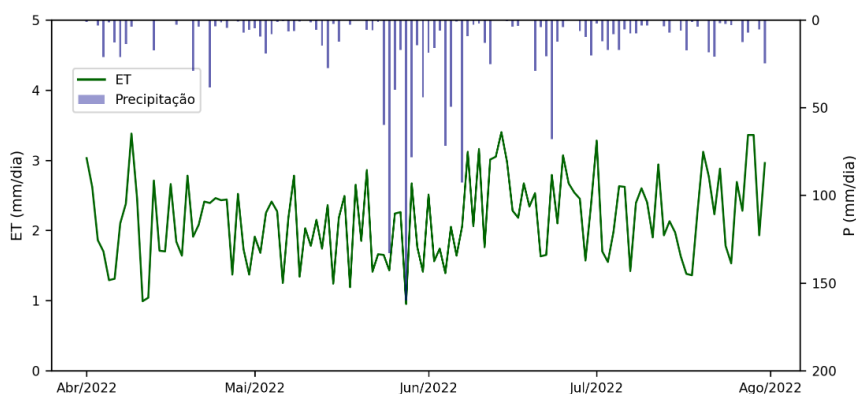
A relação entre a variabilidade da evapotranspiração e a precipitação foi analisada com dados pluviométricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), provenientes de duas estações localizadas no município de Recife: Recife–Alto da Brasileira e Recife–Codecipe/Santo Amaro. As médias espaciais das variáveis climáticas foram calculadas para a área urbana entre abril e julho de 2022, incluindo o período de um mês antes e após o evento extremo, e a correlação entre os parâmetros foi avaliada pelo coeficiente de Pearson.

RESULTADOS

A resposta da evapotranspiração diária à ocorrência de um evento extremo de precipitação registrado entre de maio e junho em Recife é demonstrado na Figura 1. Observa-se que os maiores volumes diários de precipitação ocorreram nos dias 25 (133.05 mm/dia) e 28 (160.05 mm/dia) de maio, associados à atuação de distúrbios atmosféricos provenientes do leste (Marengo et al., 2023). Durante esse período, nota-se redução ou estabilização dos valores de evapotranspiração (No dia 25/05 a ET=1.43 mm/dia e no dia 28/05 a ET=0.95 mm/dia), indicando que, apesar da elevada disponibilidade hídrica, a ET foi fortemente limitada pela diminuição da radiação solar e da temperatura do ar,

decorrentes da intensa nebulosidade. Esse comportamento reforça a dissociação imediata entre precipitação e evapotranspiração em eventos extremos. A dinâmica da evapotranspiração pode ser interpretada em termos de regimes de limitação hídrica e energética, onde, sob alta disponibilidade de água (e.g., após chuvas intensas), a ET é controlada principalmente pela energia disponível na superfície e na atmosfera, enquanto sob seca prolongada o limite hídrico torna-se dominante (Mondal e Mishra, 2024).

Figura 1 – Variabilidade da Evapotranspiração (ET) e Precipitação (P) média em Recife de Abril a Julho de 2022.



Essa relação é corroborada pela análise estatística apresentada na Tabela 1 que mostra a variação do coeficiente de correlação entre a evapotranspiração (ET) e a precipitação (P) diária em função da defasagem temporal. Observa-se correlação negativa no lag zero ($r = -0.19$), indicando que, durante os eventos de precipitação intensa, a evapotranspiração é reduzida em função da limitação energética associada à elevada nebulosidade. Nos primeiros dez dias após a ocorrência da chuva, os coeficientes permanecem próximos de zero, evidenciando ausência de resposta imediata da ET à precipitação. A partir de aproximadamente duas semanas, a correlação torna-se positiva e atinge valores máximos entre 15 e 20 dias ($r \approx 0.20-0.26$), sugerindo resposta retardada da evapotranspiração, associada ao armazenamento de água no solo e à recuperação gradual das condições de radiação e temperatura após o período chuvoso. Esse padrão indica a presença de um efeito de memória hídrica do sistema solo-vegetação, típico de regiões tropicais úmidas.

Tabela 1 – Correlação defasada entre evapotranspiração (ET) e precipitação (P) diária em Recife

Lag (dias)	0	5	10	15	20	25	30
R (ET x P)	-0.19	0.01	-0.00	0.23	0.21	-0.09	0.11

CONCLUSÕES

O estudo demonstra que, durante o evento extremo de precipitação em Recife, a evapotranspiração diária apresentou resposta imediata limitada, apesar da elevada disponibilidade hídrica. A análise da correlação entre ET e precipitação mostrou ainda que a resposta da evapotranspiração ao aporte de água no solo ocorre de forma retardada, evidenciando um efeito de memória hídrica típico de regiões tropicais úmidas. Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão dos impactos hidrológicos de chuvas intensas em ambientes urbanos tropicais e fornece subsídios para investigações futuras sobre a correlação entre a ET e outros fatores climáticos e energéticos.

REFERÊNCIAS

AHAMED, A., KNIGHT, R., ALAM, S., PAULO, R., MELTON, F. Assessing the utility of remote sensing data to accurately estimate changes in groundwater storage. *Science of The Total Environment*, v. 807, 150635, 2022.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **Atlas climatológico do Estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991–2020**. Recife: APAC, Gerência de Meteorologia e Mudanças Climáticas, 2023. 148 p. ISBN 978-65-981857-0-1.

CLAUDINO, C.M.A.; BERTRAND, G.F.; ALMEIDA, C.N.; GUSMÃO, A.C.V.; PATRIOTA, E.G.; LEMOS, F.C.; COUTINHO, J.V.; SOUSA, J.W.G.; MELO, D.C.D.; SILVA, B.B.; RODRIGUES, D.F.B.; OLIVEIRA, L.M.; XUAN, Y.; MOURA, M.S.B.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; NÓBREGA, R.L.B.; BROCCA, L.; CORBARI, C.; JIN, Y.; SUVOČAREV, K.; BEZERRA, B.; LIMA, J.R. S.; SOUZA, E.; COELHO, V.H.R. ESTIMET: Enhanced and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration algorithm for all sky conditions in tropical biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 325, 114771, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114771>.

GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (ICLEI). **Plano Local de Ação Climática de Recife (PLAC Recife)**. Recife: Prefeitura do Recife/ICLEI — Governos Locais pela Sustentabilidade, 2020. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/12/20-recife-acaoclimat-1.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: resultados para o município de Recife (PE)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LAIPELT, L., HENRIQUE, R.B.K., ANTOS, A.F., RUHOFF, A., BASTIAANSEN, W., ERICKSON, T.A., MELTON, F. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 178, 81–96, 2021.

MARENGO, J.A.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A.P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C.A.; DOLIF, G.; GONCALVES, D.; DIAS, M.A.; CUARTAS, L.A.; BENDER, F.; RAMOS, A.M.; MANTOVANI, J.R.; ALVALA, R.C.; MORAES, O.L. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, 100545, 2023.

MONDAL, S.; MISHRA, A. Quantifying the precipitation, evapotranspiration, and soil moisture network's interaction over global land surface hydrological cycle. **Water Resources Research**, 60, e2023WR034861, 2024.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. **Symposium of the society of experimental biology**, v. 19, p. 205–234, Cambridge: Cambridge University Press, 1965.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMATICAS (PBMCI), 2016. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro-RJ, 184p.

RUNNING, S.W., MU, Q., ZHAO, M., MORENO, A. **NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm User's Guide: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3)**, 2017.