

## **AValiação da Retenção de Águas Pluviais Urbanas com Base no Modelo INVEST: Estudo de Caso em Recife–PE**

*Fabricio David Simplicio Aniceto<sup>1</sup> & Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral<sup>2</sup>*

**RESUMO** – A urbanização acelerada tem intensificado o escoamento superficial e aumentado a ocorrência de inundações em áreas urbanas, evidenciando a importância dos serviços ecossistêmicos na gestão de águas pluviais. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo aplicar o modelo Urban Stormwater Retention do InVEST (InVEST-USR) para estimar a capacidade de retenção de águas pluviais no município do Recife–PE. A metodologia integrou dados de uso e cobertura da terra, grupos hidrológicos do solo, precipitação total anual e rede viária, permitindo a modelagem espacial da retenção e do escoamento superficial para o ano de 2022. Os resultados indicaram que Recife reteve cerca de 338,8 milhões m<sup>3</sup> de águas pluviais (45,6%), enquanto 380,1 milhões de m<sup>3</sup> foram convertidos em escoamento (54,4%), sendo observado que áreas com cobertura vegetal apresentam retenção aproximadamente quatro vezes maior em relação às áreas urbanas. Além disso, verificou-se correspondência entre áreas de baixa retenção e pontos recorrentes de inundação. Conclui-se que o modelo InVEST-USR é uma ferramenta relevante para o planejamento urbano, destacando a necessidade de estratégias integradas, como infraestruturas verdes e controle do uso da terra, para aumentar a resiliência a inundações.

**Palavras-chave** – Escoamento; Serviços Ecossistêmicos; Urbanização.

**ABSTRACT** – Accelerated urbanization has intensified surface runoff and increased the occurrence of flooding in urban areas, highlighting the importance of ecosystem services in stormwater management. In this context, this study aimed to apply the Urban Stormwater Retention model of InVEST (InVEST-USR) to estimate the stormwater retention capacity in the municipality of Recife–PE, Brazil. The methodology integrated land use and land cover data, soil hydrological groups, mean annual precipitation, and road network data, enabling the spatial modeling of retention and surface runoff. The results indicated that Recife retained approximately 338.8 million m<sup>3</sup> of rainwater (45.6%), while 380.1 million m<sup>3</sup> were converted into runoff (54.4%), with areas with vegetation cover showing approximately four times greater retention compared to urban areas. In addition, a correlation was found between areas of low retention and recurring flooding points. It is concluded that the InVEST-USR model is a relevant tool for urban planning, highlighting the need for integrated strategies, such as green infrastructure and land use control, to increase resilience to flooding.

**Keywords** – Runoff; Ecosystem Services; Urbanization.

### **INTRODUÇÃO**

A urbanização acelerada em escala global tem convertido paisagens naturais em superfícies impermeáveis, modificando significativamente o ciclo hidrológico urbano (Carvalho *et al.*, 2022). Esse processo intensifica o volume e a velocidade do escoamento superficial, que resulta no aumento

1) Universidade Federal de Pernambuco, Avenida da Arquitetura, s/n – Cidade Universitária, Recife-PE, 50740-550, fabricio.david@ufpe.br

2) Universidade de Pernambuco / Universidade Federal de Pernambuco, Avenida da Arquitetura, s/n – Cidade Universitária, Recife-PE, 50740-550, jaime.cabral@ufpe.br

da frequência e da intensidade de inundações, bem como na sobrecarga dos sistemas convencionais de drenagem (Yao *et al.*, 2024). Nesse contexto, a conservação e a integração de serviços ecossistêmicos de regulação hídrica fornecidos por espaços verdes tornam-se essenciais para mitigar riscos e promover a resiliência das cidades (Kadaveguru *et al.*, 2021).

O município do Recife, capital de Pernambuco, destaca-se como uma área de elevada vulnerabilidade socioambiental, figurando entre as cidades mais suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas (Rodrigues *et al.*, 2025). Associada à ocupação desordenada, à intensa impermeabilização do solo e às condições naturais, a cidade apresenta diversos pontos críticos de inundação, agravados por eventos extremos recentes, como as chuvas intensas ocorridas em 2022, que ocasionaram impactos hidrológicos e sociais significativos na região (Carvalho *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, surge a necessidade de adotar Soluções Baseadas na Natureza capazes de atuar como “cidades esponja” e retardar o escoamento das águas pluviais (Yao *et al.*, 2024). No Recife, instrumentos legais, como a Lei Municipal nº 18.112/2015 (Recife, 2015), estabelecem a obrigatoriedade de telhados verdes e reservatórios de retardo em novas edificações de impacto. No entanto, a efetividade dessas medidas depende de estratégias de manejo integrado que recuperem a capacidade de infiltração e retenção hídrica nos lotes e nas bacias urbanas.

Nesse contexto, diferentes modelos integrados de serviços ecossistêmicos são desenvolvidos para analisar os componentes dos sistemas ambientais, contribuindo para a formulação de soluções mais sustentáveis nas áreas urbanas (Kadaveguru *et al.*, 2021). Entre eles, o Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) destaca-se por sua ampla aplicação em estudos em escala municipal e de bacias hidrográficas (Kansal; Bose, 2025; Riggs *et al.*, 2026). Uma parte do InVEST concentra-se na resolução de problemas urbanos atuais, como vulnerabilidade costeira, gestão de águas pluviais, saúde mental urbana, entre outros (InVEST, 2026).

Dessa forma, diante da necessidade de fortalecer a resiliência urbana frente aos impactos da urbanização, o presente estudo tem como objetivo aplicar o modelo *Urban Stormwater Retention* do InVEST (InVEST-USR) para estimar a capacidade de retenção de águas pluviais urbanas no município do Recife–PE, com base no cenário de precipitação do ano de 2022.

## **METODOLOGIA**

### **Área de Estudo**

O município do Recife, capital do estado de Pernambuco, está localizado na região Nordeste do Brasil, com coordenadas planas de 288781.50 m E e 9107780.84 m S (Figura 1). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), Recife possui uma extensão territorial

de aproximadamente 218,84 km<sup>2</sup> e população estimada em 1.588.376 habitantes. Sua área é drenada por diferentes bacias hidrográficas e apresenta, em sua maior parcela, relevo plano, caracterizado por planícies costeiras parcialmente delimitadas por alinhamentos de morros (Carvalho *et al.*, 2022).

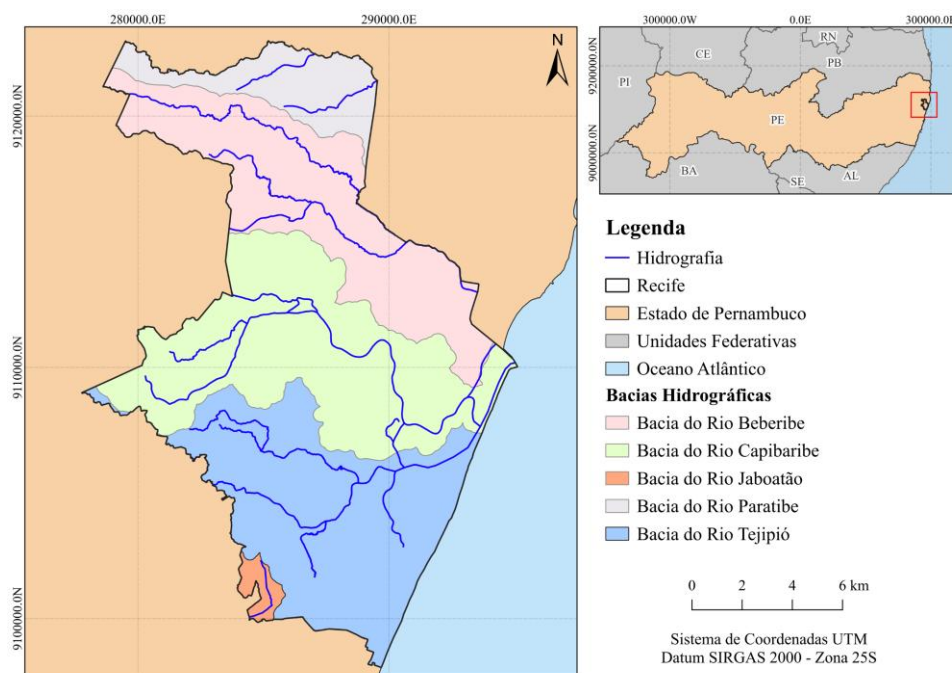


Figura 1 – Localização do município de Recife-PE com a delimitação das principais bacias hidrográficas.

Conforme a Agência Pernambucana de Águas e Clima (2023), Recife apresenta clima tropical chuvoso com verão seco, classificado como As, com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 2.457 mm. A cidade apresenta uma densa rede hidrográfica, composta, principalmente, pelos rios Capibaribe, Beberibe, Tejiptio, Jordão e Jiquiá, além de 99 canais que se estendem por cerca de 133 km (EMLURB, 2017). Na região, fatores naturais, como relevo plano, lençol freático raso e influência das marés (Rodrigues *et al.*, 2025), condicionam a ocorrência de problemas de drenagem urbana, sobretudo no período de chuvas intensas, entre abril e julho.

Recife apresenta elevada densidade de urbanização, com predominância de áreas impermeabilizadas ocupadas por edificações e vias pavimentadas (57,6%), enquanto 42,4% do território corresponde a áreas verdes e corpos hídricos (MapBiomas, 2025). Apesar disso, esses espaços verdes estão distribuídos de forma desigual entre as bacias da cidade, ampliando os riscos de desastres, sobretudo nas regiões Sul e Oeste (Rodrigues *et al.*, 2025). Essa circunstância favorece a formação de áreas mais suscetíveis às inundações nas áreas urbanas, que impactam, em especial, as populações em situação de maior vulnerabilidade (Silva *et al.*, 2023).

## Procedimentos Metodológicos

Nesse contexto, foi utilizado o modelo *Urban Stormwater Retention* (USR), proveniente da plataforma *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*, que permite avaliar e espacializar os serviços ecossistêmicos relacionados à gestão de águas pluviais, particularmente a retenção de escoamento superficial e a recarga potencial de aquíferos (InVEST, 2026). Neste estudo, foi considerada apenas a retenção de águas pluviais, por representar a capacidade do sistema em atenuar picos de escoamento. Para isso, conforme ilustra a Figura 2, foram utilizados como dados de entrada: uso e cobertura da terra do ano de 2022 (MapBiomas, 2025); grupo hidrológico do solo (ANA, 2025); precipitação acumulada de 2022 (CEMADEN, 2026); e estradas (Recife, 2026).

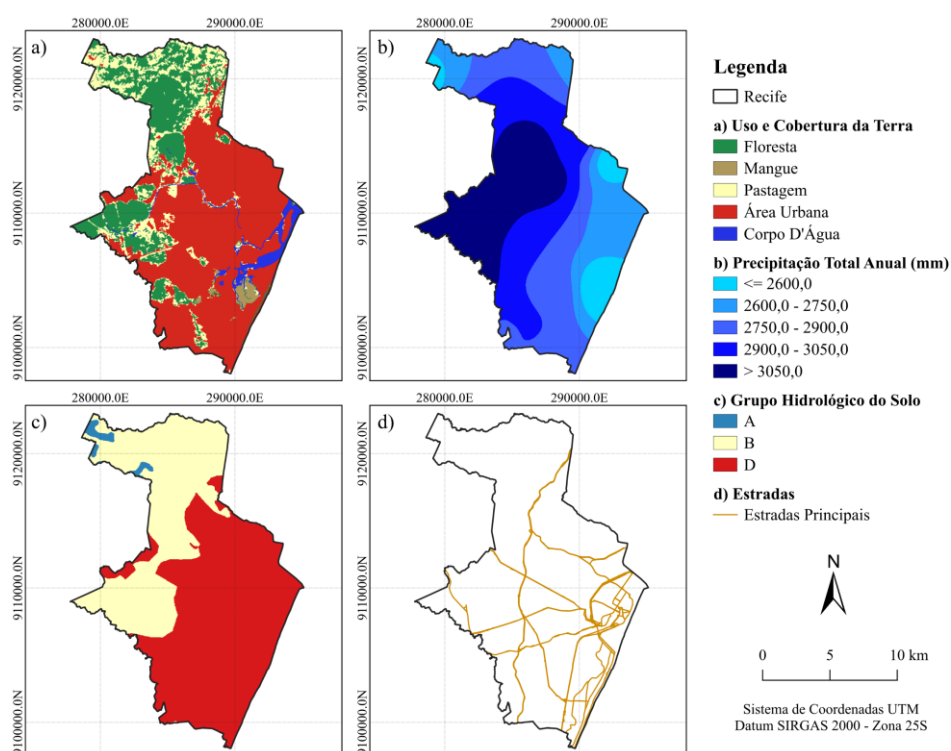


Figura 2 – Mapas dos dados de entrada do modelo: a) uso e cobertura da terra; b) precipitação acumulada de 2022; c) grupo hidrológico do solo; d) rede viária.

O modelo InVEST-USR é baseado em um balanço hídrico anual simplificado, no qual a precipitação constitui a principal entrada, enquanto a retenção e o escoamento superficial representam as saídas do sistema. Nessa abordagem, a retenção corresponde ao conjunto de processos hidrológicos que incluem interceptação, infiltração, evaporação e transpiração (Kansal; Bose, 2025). Neste estudo, foi adotada a precipitação acumulada referente ao ano de 2022, por representar o cenário mais crítico de precipitação entre os anos recentes.

Assim, para estimar a retenção com base nas classes de uso e cobertura da terra e os grupos hidrológicos do solo (A, B, C, D), foram utilizados valores anuais do coeficiente de escoamento (RC), derivados dos valores de *Curve Number* obtidos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025), segundo o método *Soil Conservation Service*. O RC, apresentado na Tabela 1, foi obtido a partir da razão entre o escoamento superficial e a precipitação anual, um valor entre 0 e 1.

Tabela 1 – Coeficiente de escoamento de acordo com as classes de uso e cobertura da terra.

| Uso e Cobertura da Terra | Conexão | RC_A | RC_B | RC_C | RC_D |
|--------------------------|---------|------|------|------|------|
| Floresta                 | 0       | 0,01 | 0,22 | 0,40 | 0,46 |
| Mangue                   | 0       | 0,76 | 0,79 | 0,81 | 0,83 |
| Pastagem                 | 0       | 0,11 | 0,38 | 0,58 | 0,70 |
| Área Urbana              | 1       | 0,43 | 0,60 | 0,72 | 0,79 |
| Água                     | 0       | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Fonte: Própria dos autores.

Para cada classe de uso e cobertura da terra (UCT), representada por  $x$ , o coeficiente de retenção (RE) foi obtido por meio da Equação 1. Com base nas camadas *rasters* de UCT, grupo hidrológico do solo e precipitação ( $P_i$ ), o modelo atribui os coeficientes de retenção de águas pluviais ( $RE_i$ ) para a área de cada *pixel*  $i$  ( $A_{pixel}$ ) em  $m^2$ , sendo calculado o volume de retenção ( $V_{RE}$ ) conforme a Equação 2. O volume de escoamento ( $V_{RU}$ ) foi obtido a partir do coeficiente de escoamento (Equação 3).

$$RE_x = 1 - RC_x \quad (1)$$

$$V_{REi} = 0,001 \cdot P_i \cdot RE_i \cdot A_{pixel} \quad (2)$$

$$V_{RUi} = 0,001 \cdot P_i \cdot RC_i \cdot A_{pixel} \quad (3)$$

Em seguida, a retenção foi ajustada (Equação 4) considerando a influência dos *pixels* vizinhos e a conectividade com a drenagem urbana, assumindo que as áreas densamente urbanizadas estão conectadas à rede de drenagem. Para isso, conforme exibe a Tabela 1, foi adotado um ajuste de conexão ( $C_i$ ) igual a 1 para a classe de área urbana, além de um raio de retenção de 10 metros, representando a distância máxima percorrida pelo escoamento superficial antes de encontrar superfícies conectadas ou infiltrar-se no solo (Kansal; Bose, 2025).

$$RE_i^{aj} = RE_i + (1 - RE_i) \times C_i \quad (4)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial da taxa de retenção (Figura 3a), considerando o cenário de 2022, evidencia a predominância de baixos valores de retenção (0,21) nas áreas urbanizadas do Recife–PE, com destaque para regiões centrais do município. Em áreas com cobertura florestal densa, mais de 78,0% da precipitação foi retida, demonstrando a importância dos espaços verdes na mitigação do escoamento (Kansal; Bose, 2025). Além disso, foi verificado que, em trechos urbanos com vegetação às margens dos rios, a taxa de retenção atinge valores superiores a 0,50. Essas regiões, associadas à presença de parques ou Unidades de Conservação, favorecem a infiltração das águas pluviais.

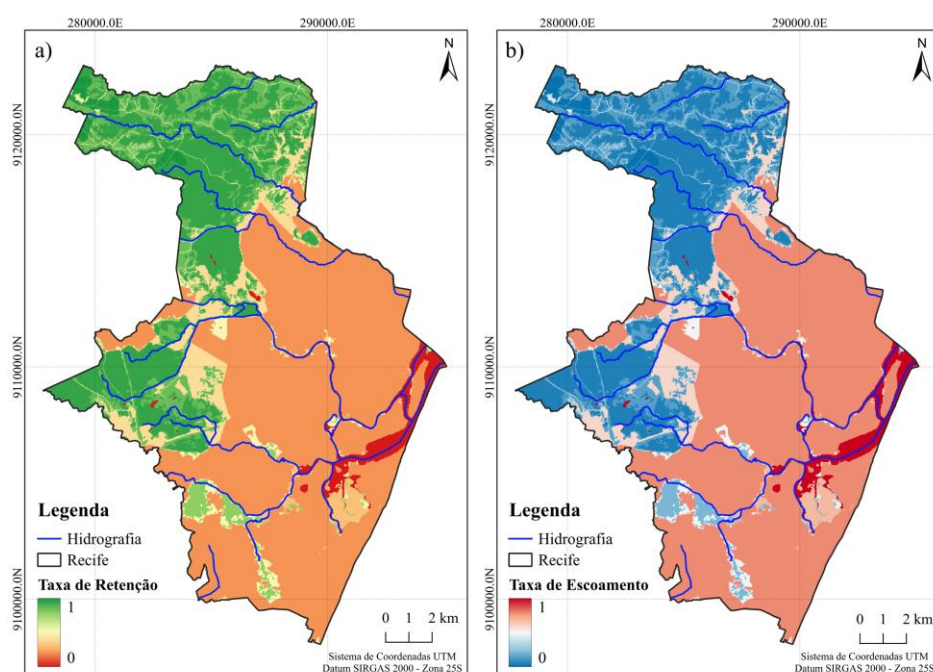


Figura 3 – Distribuição espacial das taxas de retenção (a) e escoamento superficial (b) em Recife–PE.

Nos mangues, embora apresentem elevada capacidade de armazenamento de água devido à cobertura vegetal densa, a saturação dos solos e o encharcamento característico limitam a infiltração, resultando em taxas de retenção próximas de 0,31. A capacidade de retenção aumenta em áreas urbanas associadas aos solos hidrológicos tipo A e B, que apresentam maior capacidade de infiltração, atingindo um valor de 0,40. Mesmo em solos com baixa infiltração, pode haver boa retenção se houver cobertura vegetal presente, como, por exemplo, nas áreas de pastagem em solos hidrológicos do tipo D, que apresentam valores de 0,51.

Em contrapartida, em relação ao escoamento superficial (Figura 3b), foi verificado o padrão inverso ao observado para a retenção, com maiores taxas (0,79) associadas às áreas urbanizadas e altamente impermeáveis. As regiões com cobertura florestal apresentam a menor geração de

escoamento superficial entre as diferentes classes de uso e cobertura da terra, sobretudo quando inseridas em solos hidrológicos tipo A.

Nesse contexto, a Figura 4 apresenta o volume de retenção e escoamento das cinco principais bacias hidrográficas inseridas em Recife-PE no ano de 2022. Com isso, foi constatado que, embora ocupe a menor porção da área do município (2,4%), a bacia do rio Jaboatão recebeu cerca de 15,7 milhões de m<sup>3</sup> de águas pluviais no ano de 2022, dos quais apenas 21,2% foram retidos.

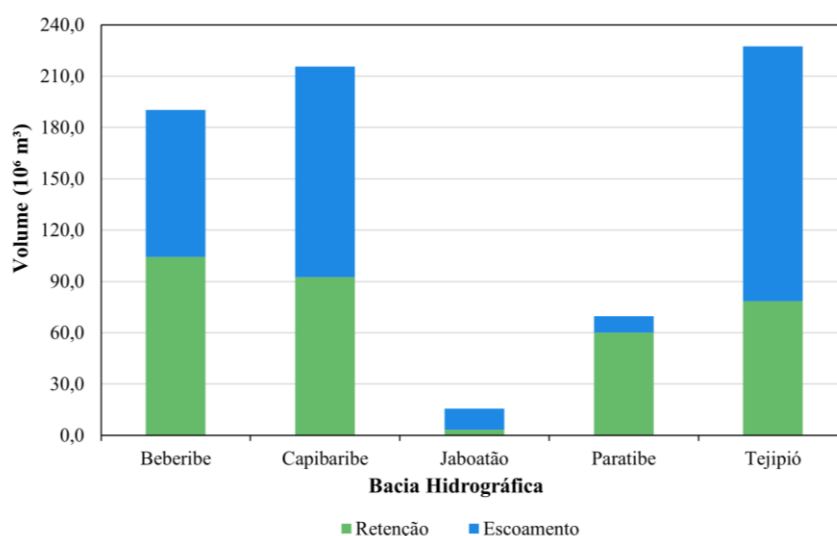


Figura 4 – Análise comparativa dos volumes de retenção e escoamento por bacia hidrográfica em Recife-PE.

Por outro lado, a bacia do rio Tejiptó, que apresenta a maior área de ocupação do Recife (32,9%), concentrou cerca de 227,4 milhões de m<sup>3</sup> de águas pluviais e reteve 33,3% desse volume, indicando um cenário mais crítico entre as bacias analisadas. Esse cenário é reflexo da urbanização desordenada e da ocupação irregular de áreas naturais de amortecimento de cheias na bacia, circunstâncias que contribuem para a intensificação dos eventos de inundação, sobretudo quando eventos de chuvas intensas coincidem com picos de maré alta (Silva, 2019).

Apesar de ocupar apenas 10,0% da área do município, a bacia do rio Paratibe registrou um volume de 69,7 milhões de m<sup>3</sup> de águas pluviais e apresenta, percentualmente, a maior taxa de retenção (86,3%), em função da maior proporção de áreas florestais e de pastagem, que contribuem para atenuação do escoamento superficial (Natarajan *et al.*, 2021). Em geral, as bacias hidrográficas do Recife atingiram uma retenção de cerca de 338,8 milhões de m<sup>3</sup> de águas pluviais em 2022 (47,1%), enquanto 380,1 milhões de m<sup>3</sup> foram convertidos em escoamento superficial (52,9%). Esses resultados indicam a necessidade de adoção de estratégias adaptativas locais para o manejo do escoamento, visando aumentar a resiliência aos eventos de inundação (Leta; Adugna, 2024).

Em Recife, a maior parcela da retenção está associada às áreas de Unidades de Conservação. Rodrigues *et al.* (2025) identificaram uma tendência de regeneração florestal entre 1990 e 2020 no município, o que se reflete nas taxas de retenção observadas neste estudo. Em consonância com esses resultados, a Figura 5 apresenta a delimitação das 23 Unidades de Conservação municipais do Recife, evidenciando que essas áreas desempenham papel fundamental na retenção das águas pluviais.

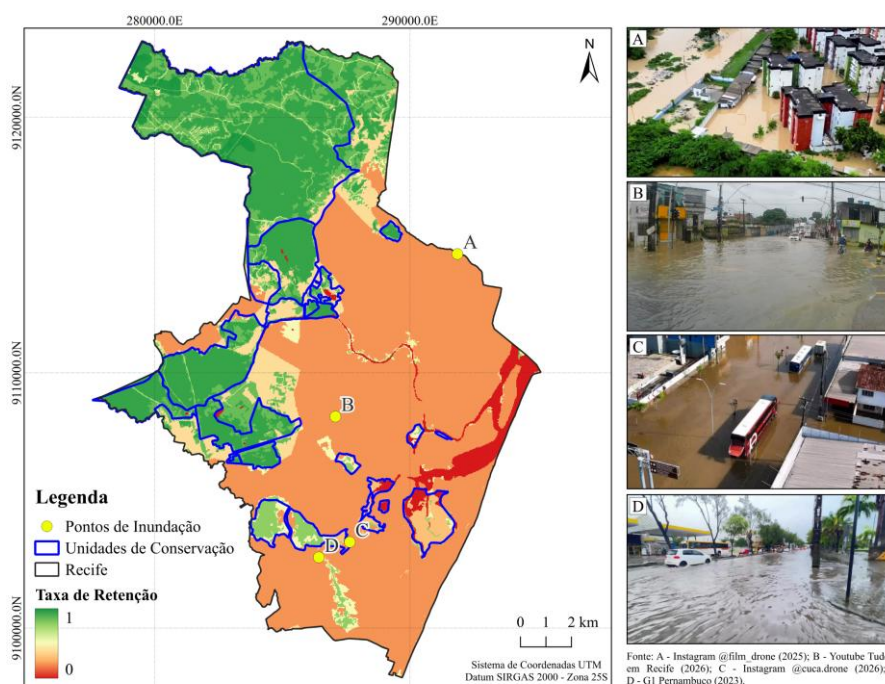


Figura 5 – Distribuição espacial da taxa de retenção associada às Unidades de Conservação e aos pontos de inundação em Recife-PE: A) Rua Beberibe-Rio; B) Av. Dois Rios; C) Av. Recife; D) Av. Eng. Abdias de Carvalho

De forma complementar, a Figura 5 também ilustra episódios recentes de inundações ocorridos em importantes vias urbanas do município do Recife, dos quais três (B, C e D) estão localizados na bacia do rio Tejipió, enquanto o ponto A se encontra na bacia do rio Beberibe. Esses registros coincidem com áreas de baixa taxa de retenção (0,21) e corroboram a eficácia do modelo utilizado neste estudo. Além disso, essa correspondência espacial reforça a relação entre baixos índices de retenção e maior risco de inundação nas áreas urbanas (Mondal *et al.*, 2025).

Com base nos padrões observados na cidade do Recife, torna-se fundamental a adoção de estratégias integradas de manejo de águas pluviais que atuem tanto em escala de bacia quanto de microbacia (Leta; Adugna, 2024). Nesse sentido, a combinação de medidas estruturais e não estruturais, incluindo implantação de infraestruturas verdes, planejamento do uso e cobertura da terra e controle da ocupação em áreas vulneráveis (Natarajan *et al.*, 2021), é apontada como uma estratégia eficaz para promover a adaptação e aumentar a resiliência das cidades frente a eventos extremos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a aplicabilidade do modelo InVEST-USR na avaliação espacial da retenção de águas pluviais em Recife-PE, evidenciando sua capacidade de identificar padrões hidrológicos associados ao uso e cobertura da terra. Os resultados evidenciam que áreas urbanizadas apresentam baixas taxas de retenção (0,21), enquanto áreas com cobertura vegetal podem alcançar valores superiores a 0,78, correspondendo a níveis aproximadamente quatro vezes maiores que os observados nas áreas urbanas. Em geral, o município apresentou 47,1% de retenção do volume precipitado em 2022, com contribuição relevante das Unidades de Conservação, sendo constatado que locais com baixa retenção estão associados aos pontos recorrentes de inundação.

Diante disso, o estudo contribui para o planejamento urbano resiliente ao fornecer subsídios para a adoção de estruturas adaptativas em áreas críticas do município. No entanto, limitações relacionadas à simplificação do modelo e à ausência de variáveis socioeconômicas indicam a necessidade de estudos futuros que promovam abordagens mais integradas, incluindo a percolação e a valoração dos serviços ecossistêmicos de retenção de águas pluviais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Projeto de Revitalização de Riachos Urbanos.

## REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2025). “*Curva Número na Base Ottocodificada*”. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2023). *Atlas climatológico do estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991-2020*. Recife: APAC. 148 p.
- CARVALHO, M. E. F. S.; SILVA, J. C. A.; RIBEIRO, M. H.G. (2022). “*Revitalização de rios através de soluções baseadas na natureza: o parque Caiara como elemento de recuperação do rio Capibaribe, Recife-PE*” in Anais do XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas, Brasília, 2022.
- CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2026). “*Mapa Interativo*”. Disponível em: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#>. Acesso em: 07 mai. 2026.
- EMLURB - Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana. (2017). “*Plano diretor de drenagem e manejo de águas pluviais da cidade Recife*”. Recife: EMLURB. 43 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). “*Recife - Cidades e Estados*”. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 29 abr. 2026.

InVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs. (2026). “*InVEST*”. Disponível em: <https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest>. Acesso em: 15. abr. 2026.

KADAVERUGU, A.; RAO, C. N.; VISWANADH, G. K. (2021). “*Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: a case study of Hyderabad city, India*”. Modeling Earth Systems and Environment 7, pp. 589-602.

KANSAL, M. L.; BOSE, S. (2025). “*Ecosystem services importance in stormwater management and flood risk mitigation through InVEST model—a case study on MCD zones of Delhi*”. Sustainable Water Resources Management 11(30).

LETA, B. M.; ADUGNA, D. (2024). “*Quantifying flood risk using InVEST-UFRM model and mitigation strategies: the case of Adama City, Ethiopia*”. Modeling Earth Systems and Environment 10, pp. 3257-3277.

MapBiomias. (2025). “*Coleções MapBiomias*”. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 30 mar. 2026.

MONDAL, I. et al. (2025). “*Mitigating coastal flood risks in the Sundarbans: A combined InVEST and machine learning approach*”. Physics and Chemistry of the Earth 138, e103855.

NATARAJAN, L. et al. (2021). “*Flood Susceptibility Analysis in Chennai Corporation Using Frequency Ratio Model*”. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 49, pp. 1533-1543.

RECIFE. (2026). “*Área Urbana*”. Disponível em: <https://dados.recife.pe.gov.br/dataset/area-urbana>. Acesso em: 15 abr. 2026.

RECIFE. (2015). “*Lei Nº 18.112/2015*”. Disponível em: <http://leis.org/cjeuk>. Acesso em: 30 abr. 2026.

RIGGS, A.; RICHTER, S. M.; BEE, B. (2026). “*Assessing Nutrient Export and Stormwater Retention Amid Urban Growth in Greenville, North Carolina*”. The University of North Carolina Press.

RODRIGUES, A. B. et al. (2025). “*Predictive modelling of land use land cover dynamics for a coastal urban city in Brazil*”. Journal of Environmental Management 391, e126586.

SILVA, N. M. M. et al. (2023). “*Estimativa de áreas inundáveis no meio urbano a partir do descritor do terreno HAND: desafios e oportunidades*” in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, 2023.

SILVA, P. O. (2019). “*Modelagem hidrológica do rio Tejipió por ocasião de chuvas intensas levando em conta o efeito de marés*”. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

YAO, S.; HUANG, G.; CHEN, Z. (2024). “*Evaluation of urban flood adaptability based on the InVEST model and GIS: A case study of New York City, USA*”. Natural Hazards 120, pp. 11063-11082.