

MODELAGEM HIDRÁULICA-HIDROLÓGICA DOS EFEITOS DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS NA DRENAGEM DA SUB-BACIA URBANA DO CANAL 4, SANTOS-SP

HYDRAULIC-HYDROLOGICAL MODELING OF THE EFFECTS OF SUSTAINABLE SOLUTIONS ON THE DRAINAGE OF THE CANAL 4 URBAN SUB-BASIN, SANTOS-SP

Kauê Leocádio Gomes, Guilherme Cerqueira Da Silva, Matheus Souza Ruiz, Regina de Souza Ferreira, Alexandra Franciscatto Penteado Sampaio

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: kaueleocadio.official@gmail.com

RESUMO – A intensificação das mudanças climáticas e a urbanização elevada agravam os problemas de drenagem em cidades costeiras como Santos-SP, devido à impermeabilização do solo, a influência permanente do nível do mar e os eventos extremos de chuva mais frequentes. Este trabalho avalia o uso de soluções sustentáveis, como a implementação pavimentos permeáveis e jardins de chuva, na sub-bacia do Canal 4, utilizando modelagem hidráulica-hidrológica de escoamento com o software MIKE+. Foram empregados dados pluviométricos, de vazão do canal, topográficos e de uso do solo, com calibração por métricas estatísticas como o Coeficiente de Determinação (R^2) e Erro Quadrático Médio (RMSE). Resultados iniciais comprovaram a eficácia dessas soluções na redução dos riscos de alagamentos frente ao sistema atual.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Modelagem Numérica; Gestão de Águas Pluviais; MIKE+.

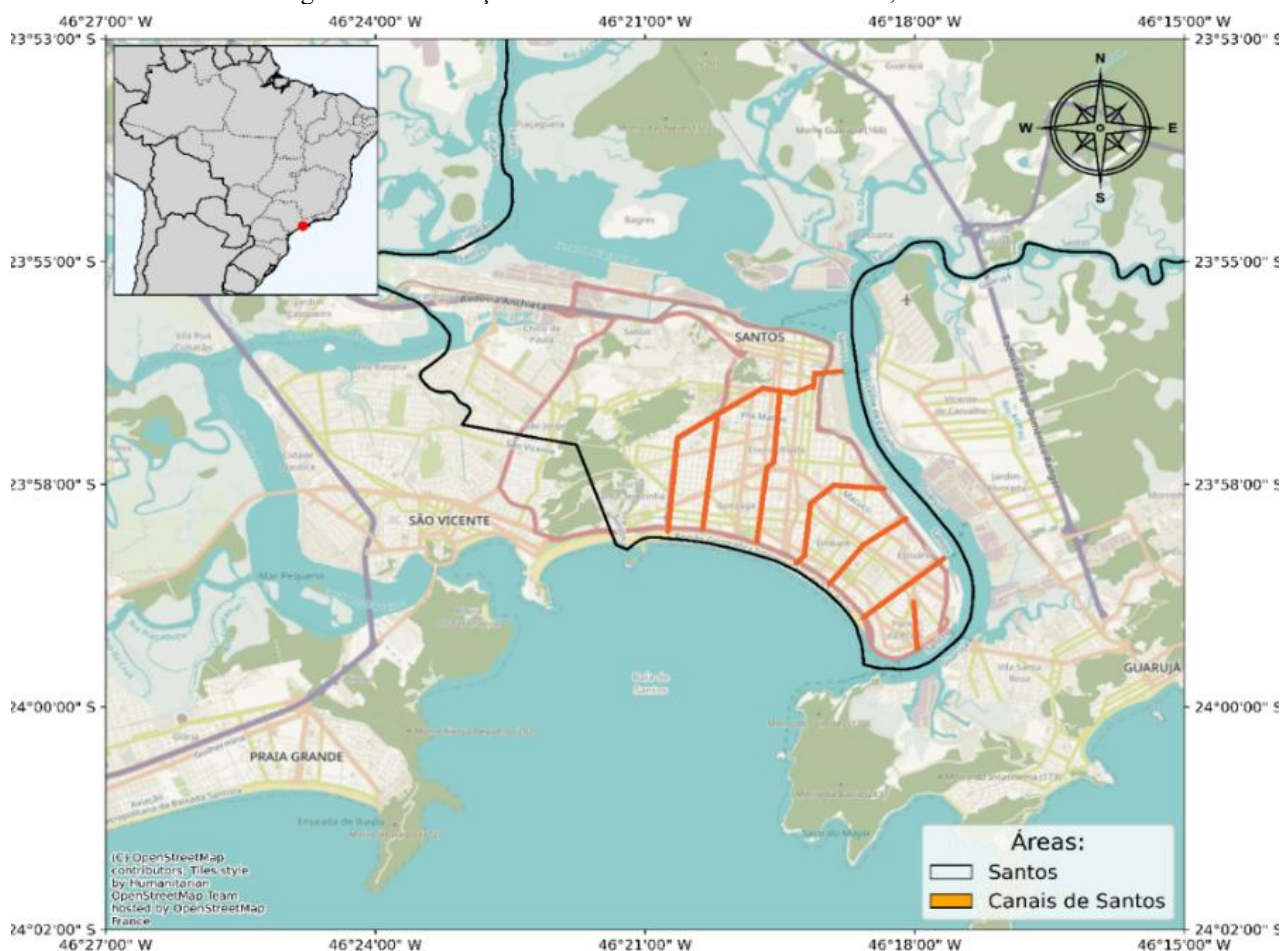
ABSTRACT – The intensification of climate change and urbanization aggravates drainage problems in coastal cities such as Santos-SP, due to soil impermeabilization and increasingly frequent extreme rainfall events. This study evaluates the feasibility of sustainable solutions, such as permeable pavements and rain gardens, in the Canal 4 sub-basin, using hydraulic-hydrological modeling in MIKE+. Rainfall, flow, topographic, and land-use data were employed, with calibration based on statistical metrics such as the Coefficient of Determination (R^2) and Root Mean Square Error (RMSE). The results confirmed the effectiveness of these alternatives in reducing flood risks compared to the current system.

Keywords: Sustainability; Numerical Modeling; Stormwater Management; MIKE+.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas figuram entre as maiores ameaças globais, refletidas no aumento da temperatura média, na intensificação e frequência de eventos extremos (IPCC, 2023). O derretimento de geleiras e a elevação do nível do mar, ampliam os riscos em regiões suscetíveis a inundações, como evidenciado em Porto Alegre (2024) e em toda a região do Litoral Norte de São Paulo (2023), demonstrando a crescente vulnerabilidade urbana a desastres hidrológicos (Marengo *et al.*, 2024). Nesse contexto de crescente vulnerabilidade, o município de Santos (Figura 1) destaca-se como um dos mais populosos do estado de São Paulo, configurando-se como o principal centro urbano da Região Metropolitana da Baixada Santista (IBGE, 2022). O sistema de drenagem urbana da cidade foi concebido por Saturnino de Brito e implementado por meio da construção dos canais de Santos, concluídos em 1927.

Figura 1. Localização da Cidade de Santos. Fonte: Autor, 2025



Atualmente, esse sistema apresenta limitações, refletidas na recorrência de alagamentos, fenômeno associado ao intenso processo de urbanização. Conforme Tucci (1995), os impactos da drenagem urbana tendem a ser agravados pelo avanço da impermeabilização do solo, decorrente da substituição da cobertura vegetal por áreas edificadas e pavimentadas.

A área de estudo desse projeto é a sub-bacia urbana do Canal 4, que constitui os bairros do Boqueirão, Macuco e Embaré, possui alta densidade populacional e infraestrutura antiga, sendo prioritária na busca por mudanças. Nesse cenário, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), como pavimentos permeáveis e jardins de chuva, aparecem como alternativas sustentáveis à infraestrutura cinza e impermeável, pois reduzem o escoamento superficial, facilitam a recarga do lençol freático, e ajudam para a valorização do ambiente urbano.

A gestão hídrica urbana demanda modelos hidrológicos e hidráulicos: os primeiros simulam precipitação, infiltração e escoamento; os segundos, o fluxo em condutos (Silva, 2007; Righetto, 1977). A integração viabiliza prever eventos críticos, identificar áreas vulneráveis e testar cenários de uso do solo. O software MIKE+, desenvolvido pela Danish Hydraulic Institute, é uma plataforma abrangente para modelagem e gestão de águas pluviais, que foi escolhida para o projeto exatamente por sua integração de outros modelos numéricos dentro do *software*, como o MIKE21, MIKE SHE, FEFLOW (DHI, 2020).

O temporal ocorrido em 18 de fevereiro de 2025, afetou o litoral paulista e deixou um rastro de destruição em Santos, evidenciou mais uma vez a vulnerabilidade das cidades costeiras frente aos eventos climáticos extremos (G1, 2025). Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), alguns pontos da cidade registraram mais de 150 mm de chuva em poucas horas, volume suficiente para sobrecarregar o sistema de drenagem. Essa combinação de condições meteorológicas e oceanográficas severas e alta impermeabilização do solo, decorrente da urbanização acelerada, acentua a necessidade na adoção de soluções sustentáveis de manejo das águas pluviais.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, por meio de modelagem hidráulica-hidrológica, o impacto da implementação de pavimentos permeáveis e jardins de chuva na drenagem da sub-bacia do Canal 4. Para este fim, foram definidos os seguintes objetivos específicos: i) levantar e processar dados de precipitação, topografia, uso do solo e da rede de drenagem da área de estudo; ii) configurar e calibrar o modelo hidrológico-hidráulico MIKE

URBAN+; iii) comparar os indicadores de escoamento superficial e infiltração entre o cenário convencional e o cenário com as SbN implementadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado através de modelagem numérica com o software MIKE+, seguindo três etapas: aquisição e processamento de dados, configuração do modelo, calibração e validação.

Os dados de precipitação foram coletados da estação Estuário (lat. -23,967; long. -46,305), obtidos através da rede de pluviômetros (Figura 2) do Mapa Interativo do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Mapa Interativo – CEMADEN, 2025), na ausência desses dados, foi utilizada informação da estação mais próxima geograficamente, que é a estação Ponta da Praia (lat. -46.300; long. -23.981).

A topografia utilizada foi com base no levantamento feito em 2023 com drones e sensores *Light Detection and Ranging* (LiDAR) realizada pela Prefeitura Municipal de Santos (PMS). Após o tratamento dos dados espúrios foi confeccionado um Modelo Digital de Terreno (MDT), Figura 3, com resolução de 50cm através do software QGIS.

Figura 2. Localização dos Pluviômetros. Fonte: Mapa Interativo CEMADEN



Figura 3. Modelo Digital da bacia do canal 4 usando dados LiDAR, Fonte: Autor, 2025



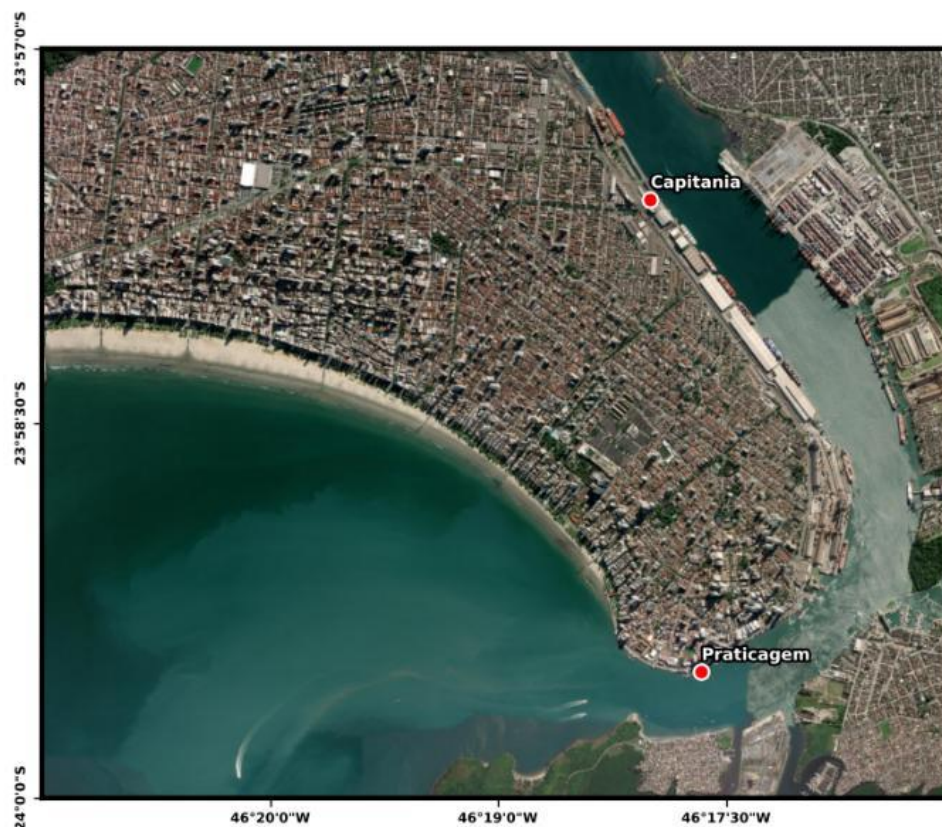
Dados do município de uso e ocupação do solo, loteamento e rede de micro drenagem utilizados, essenciais para a definição da impermeabilidade do terreno, foram retirados do Diagnóstico de Revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento e Expansão Urbana do Município de Santos (SANTOS, 2021) e da Coordenadoria de Informações Urbanas (COINURB, 2021).

A medição de vazão de lançamento do Canal 4 foi fornecida pela Gestão de Recursos Hídricos da Unidade de Negócio de Produção de Água da Metropolitana (MA/Sabesp), com dados de um medidor ultrassônico portátil (ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*) em levantamento realizado em 15 e 16 de junho de 2015 (Ribeiro *et al.*, 2019).

Resultados de nível do mar foram extraídos de simulações do Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília (NPH-UNISANTA), através do modelo Delft3D-FLOW (Ruiz *et al.*, 2021) nos pontos mais próximos da orla e do estuário, sendo eles os pontos Praticagem e Capitania (Figura 4).

No MIKE+, foram simulados dois cenários: 1) A drenagem convencional atual, e 2) Com as aplicações de SbN (pavimentos permeáveis e jardins de chuva) integradas. O modelo quantificará a redução do escoamento superficial e o aumento da infiltração da bacia, avaliando a aplicabilidade das SbN para diminuir alagamentos.

Figura 4. Localização dos resultados do modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, Fonte: Autor, 2025



A calibração do modelo usa as métricas estatísticas a seguir, comparando-as com as medições de vazão, coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash), erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2), conforme Nash & Sutcliffe (1970) e Moriasi *et al.* (2007). A qualidade da calibração será classificada segundo Moriasi *et al.* (2007) em "muito bom", "bom", "razoável" ou "ruim", garantindo confiabilidade dos resultados simulados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio das simulações no MIKE+ permitiram comparar o comportamento hidrológico da sub-bacia do Canal 4 nos dois cenários distintos.

A calibração do modelo foi realizada utilizando as séries temporais de vazão medidas no ponto de descarga do Canal 4 e o evento de precipitação na data. Os resultados (Figura 5) apresentaram um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,68, $R^2 = 0,51$, e RMSE = 0,63, classificando o desempenho do modelo como “Bom”, segundo os critérios (Tabela 1) de Moriasi *et al.* (2007). A validação confirmou a capacidade preditiva do modelo, com valores

similares após ajustes em definições do Tempo de Concentração (Tc) e características do canal. Esses resultados asseguram uma confiabilidade das simulações nos cenários propostos.

Figura 5: Resultados dos Escoamentos na bacia do canal 4, em azul ciano o escoamento na direção do estuário e em amarelo na direção da orla da praia. Fonte: Autor, 2025

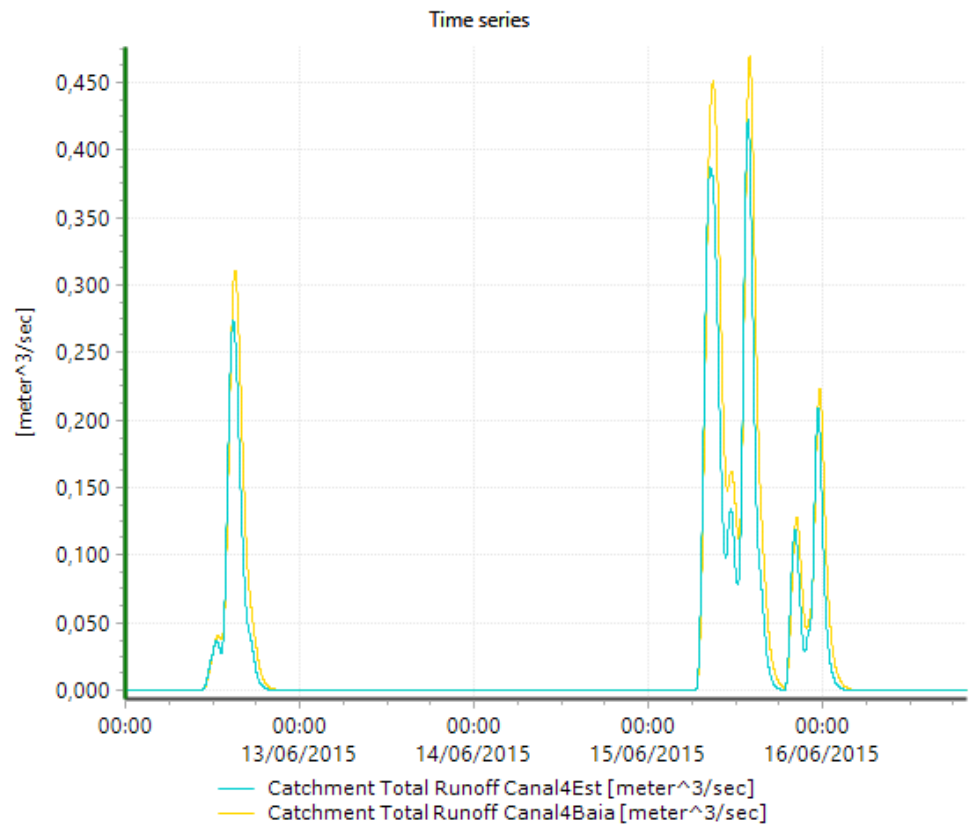


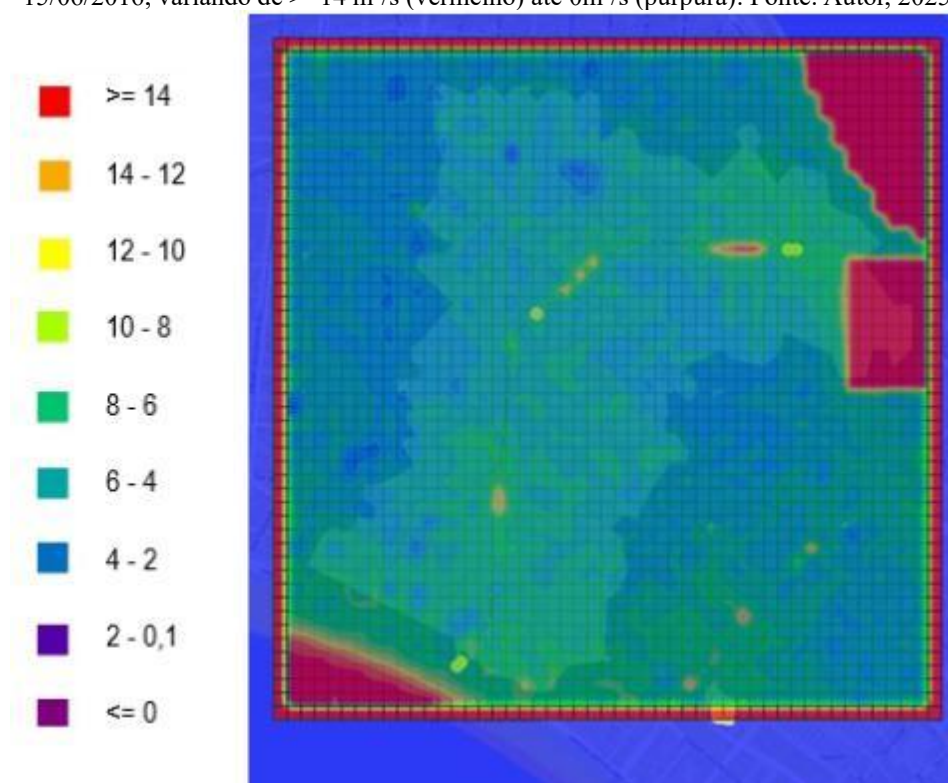
Tabela 1 – Classificações gerais de desempenho para estatísticas recomendadas em um passo de tempo mensal. Fonte: Adaptado, Moriasi et al. (2007).

Avaliação	Nash	R ²	RMSE
Muito Bom	0,75 - 1,00	0,70 - 1,00	0,00 - 0,50
Bom	0,65 - 0,75	0,50 - 0,70	0,50 - 0,60
Razoável	0,50 - 0,65	0,30 - 0,50	0,60 - 0,70
Ruim	< 0,50	< 0,30	> 0,70

No cenário atual, observou-se alta taxa de escoamento superficial e baixa infiltração, com o pico de vazão concentrado poucos minutos após o início das chuvas intensas. O escoamento superficial médio na sub-bacia atingiu aproximadamente 60% da precipitação total, evidenciando a forte impermeabilização do solo urbano.

As regiões mais críticas foram identificadas nas áreas centrais do Boqueirão (Figura 6), no entorno da Avenida Afonso Pena, e toda a extensão da Avenida Siqueira Campos, onde o escoamento foi de 8 à 14 m³/s durante os períodos de maior intensidade de chuva. Tais resultados corroboram registros de noticiários e relatos de alagamentos fornecidos pela Defesa Civil de Santos.

Figura 6. Instante mais Crítico do escoamento superficial na Sub-bacia urbana do canal 4 da data do dia 15/06/2016, variando de ≥ 14 m³/s (vermelho) até 0m³/s (púrpura). Fonte: Autor, 2025



Com a inserção de pavimentos permeáveis e jardins de chuva, utilizando o método de estimativa do MIKE+, calculando os polígonos de pavimento na Av. Siqueira Campos e áreas de calçadas como polígonos para jardins de chuva através do *Google Earth*, os resultados do modelo indicaram uma melhora no volume total de escoamento superficial e um aumento na infiltração, com o ponto mais crítico com vazão de 8m³/s. Além disso, o pico de vazão na seção de saída do Canal 4 foi reduzido em cerca de 18%. Esta defasagem hidrológica demonstra preliminarmente a capacidade dessas soluções em reter e infiltrar parte da água da chuva, aliviando o sistema de micro drenagem e reduzindo o risco de sobrecarga nas galerias.

A análise espacial dos resultados mostra que as áreas com maior impacto positivo foram aquelas onde houve substituição de pavimentos convencionais por permeáveis. Já os jardins de chuva implementados em canteiros e praças contribuíram para reduzir pontos de acúmulo de água e melhorar a drenagem local. Observou-se também que a capacidade de infiltração adicional proporcionada pelas SbN reduziu o volume de água direcionado ao canal principal, o que, em termos práticos, representa menor pressão hidráulica sobre as comportas e estruturas de descarga próximas ao estuário.

Os resultados reforçam a eficácia das Soluções Baseadas na Natureza como instrumentos complementares aos sistemas de drenagem sustentável, que destacam a integração de infraestrutura verde como uma metodologia capaz de aliviar o risco de inundações urbanas. Além dos benefícios hidráulicos, as SbN contribuem para a melhoria microclimática e valorização do espaço urbano, impulsionando um ambiente mais resiliente e sustentável. No entanto, ressalta-se que a efetividade a longo prazo depende da manutenção periódica das estruturas e da adequação dos materiais permeáveis às condições locais de solo e clima.

4 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar preliminarmente o impacto da implementação de soluções baseadas na natureza, como pavimentos permeáveis e jardins de chuva na drenagem da sub-bacia do Canal 4, em Santos, utilizando modelagem hidráulica-hidrológica. Os resultados obtidos demonstraram que a adoção dessas soluções resultou em uma redução do escoamento superficial e um aumento na infiltração das águas pluviais, com potencial de mitigação dos alagamentos na área de estudo. As simulações realizadas no modelo hidrológico-hidráulico MIKE+ indicaram que, com a implementação das SbN, a capacidade de drenagem da sub-bacia como um todo melhorou consideravelmente, com uma diminuição no risco de inundação, principalmente em áreas mais vulneráveis à impermeabilização do solo. A calibração do modelo mostrou um bom desempenho, com os resultados simulados apresentando um coeficiente de Nash-Sutcliffe satisfatório e valores de erro quadrático médio (RMSE) dentro dos limites aceitáveis. Sendo assim, representando bem a realidade. Esses resultados demonstram o potencial da modelagem no estudo das soluções baseadas na natureza como alternativas sustentáveis à infraestrutura tradicional de drenagem urbana. Agradecemos à

Prefeitura Municipal de Santos, ao CEMADEN, à SABESP e ao NPH-UNISANTA pela disponibilização dos dados necessários. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a simulação de um maior número de cenários de chuvas intensas, bem como a aplicação do modelo em outras sub-bacias da cidade, com o objetivo de avaliar a viabilidade de implementação das SbN em maior escala no município e considerando efeitos oriundos do agravamento das mudanças climáticas.

5 REFERÊNCIAS

CEMADEN. Mapa Interativo do CEMADEN. 2025. Disponível em: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br>. Acesso em: 1 set. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTOS. Painel de Dados - Município de Santos. Santos: COINURB, 2021. Disponível em: <https://www.santos.sp.gov.br/coinurb/painel-de-dados>. Acesso em: 13 out. 2025.

G1 SANTOS E REGIÃO. Temporal volta a castigar o litoral de SP; veja o rastro de destruição. G1, 19 fev. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2025/02/19/temporal-volta-a-castigar-o-litoral-de-sp-veja-o-rastro-de-destruicao-video.ghml>. Acesso em: 11 out. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Boletim de precipitação acumulada: fevereiro de 2025. Brasília, DF: INMET, 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 1 mar. 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Genebra: IPCC, 2023.

MARENGO, Jose et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, v. 38, p. 203–228, 2024. DOI: 10.1590/s0103-4014.202438112.012

MORIASI, Daniel N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. ISSN 0001-2351.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

RIBEIRO, Renan Braga et al. Modelagem como ferramenta de gestão visando a qualidade da água balnear. In: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE (FENASAN), 30., 2019, São Paulo. São Paulo: AESABESP, 2019.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. Desenvolvimento de modelos de simulação para o dimensionamento de redes de distribuição de água. 1977. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1977. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/T.18.1977.tde-20250523-142512>. Acesso em: 13 out. 2025.

RUIZ, Matheus Sousa.; HARARI, Joseph; RIBEIRO, Renan Braga.; SAMPAIO, Alexandra Franciscatto Penteado. Numerical modelling of storm tides in the Estuarine System of Santos, São Vicente and Bertioga (SP, Brazil). *Regional Studies in Marine Science*, v. 44, 2021, 101791. ISSN 2352-4855. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101791

SANTOS (Município). Prefeitura. Diagnóstico de Revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento e Expansão Urbana do Município de Santos. Santos: Prefeitura Municipal, 2021.

SILVA, Leonardo Pereira. Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; GENZ, Fernando. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; PORTO, Rodrigo de Melo; BARROS, Mario Thadeu de Leme (org.). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Editora da Universidade/ABRH, 1995. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 5).