

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM URBANA NA ILHA DE SÃO VICENTE: CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDRODINÂMICO QUASI-2D

*Matheus Martins de Sousa¹; Bruna Peres Battemarco²; Henrique Michelotti Gama Barbosa³;
Myrian da Silva Portes⁴; Marcelo Gomes Miguez⁵*

Abstract: Urban flooding in coastal areas is an increasingly critical challenge, driven by climate change and unplanned urban expansion. This study aimed to develop and calibrate a Quasi-2D hydrodynamic model, using MODCEL, to represent the drainage system of the northwestern plains of São Vicente Island, focusing on the Northwest Zone of Santos. The modeling considered the combined effects of intense rainfall and meteorological tides, incorporating local topographic, hydraulic, and land use characteristics. The study area was discretized into over one thousand flow cells, including channels, urban surfaces, and micro-drainage elements. Boundary conditions included representative tidal curves for the Santos estuary. Model calibration was performed by comparing simulated flood extents with flood maps provided by the municipal government, supplemented by records of flood events reported in local media. Two scenarios were simulated: one considering only the meteorological tide and another combining tide with intense rainfall corresponding to a 10-year return period. Results showed good agreement between simulated and observed flood-prone areas, despite the limitation of not having simultaneous rainfall and water level measurements. The study provides a solid technical basis for future drainage system evaluations, supporting the planning of interventions aimed at minimizing flood impacts on the most vulnerable areas of the region.

Resumo: As inundações urbanas em áreas costeiras representam um desafio crescente diante das mudanças climáticas e da expansão urbana desordenada. Este estudo teve como objetivo construir e calibrar um modelo hidrodinâmico Quasi-2D, utilizando o MODCEL, para representar o sistema de drenagem da planície noroeste da Ilha de São Vicente, com foco na Zona Noroeste de Santos. A modelagem considerou os efeitos combinados de chuvas intensas e marés meteorológicas, contemplando as características topográficas, hidráulicas e de uso do solo. A área de estudo foi discretizada em mais de mil células de escoamento, incluindo canais, superfície urbana e elementos de microdrenagem. As condições de contorno incluíram curvas de maré representativas do estuário de Santos. A calibração foi realizada por meio da comparação entre as áreas de inundaçao simuladas e os mapas de alagamentos fornecidos pela prefeitura, complementados por registros de eventos reportados na mídia local. Foram simulados dois cenários: um considerando apenas a maré meteorológica e outro com a combinação de maré e chuva intensa com período de retorno de 10 anos. Os resultados indicaram boa concordância entre as simulações e os dados observados, mesmo com a limitação de não haver medições simultâneas de chuva e níveis d'água. O estudo forneceu uma base

1) Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. matheus@poli.ufrj.br

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. brunabattemarco@eng.uerj.br

3) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Brasil. henrique.michelotti@poli.ufrj.br

4) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Brasil. myrianportes@poli.ufrj.b

5) Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. marcelomiguez@poli.ufrj.br

técnica sólida para futuras avaliações de projetos de drenagem, contribuindo para o planejamento de intervenções que minimizem os impactos das inundações nas áreas mais vulneráveis da região.

Palavras-Chave – Modelo Hidrodinâmico Quasi-2D, Inundações Urbanas, Infraestrutura de Drenagem Costeira.

INTRODUÇÃO

A Ilha de São Vicente, localizada na região da Baixada Santista, no litoral do Estado de São Paulo, ao sudoeste da Ilha de Santo Amaro, apresenta predominância urbana, dividida entre os municípios de Santos e São Vicente, com a maior parte da população vivendo nas áreas urbanizadas. Destaca-se a presença do Porto de Santos, situado no estuário que separa a Ilha de Santo Amaro do continente, reconhecido como um dos maiores portos do mundo.

A região central da Ilha é caracterizada por morros que dividem a área em duas grandes planícies: a planície leste, pertencente ao município de Santos, e a planície oeste, cujo trecho norte está sob jurisdição de Santos e o sul pertence à São Vicente.

Diante da vulnerabilidade da região a inundações, este estudo tem como objetivo construir e calibrar um modelo hidrodinâmico Quasi-2D para avaliar o sistema de drenagem da planície noroeste da Ilha de São Vicente, apoiando intervenções na infraestrutura de drenagem.

METODOLOGIA

O modelo hidrodinâmico utilizado neste estudo é o Modelo de Células de Escoamento Urbano – MODCEL, desenvolvido por Miguez *et al.* (2017). O MODCEL trabalha com o conceito de células, desenvolvido na década de 1960 por Zanobetti, Lorgerè, Preissman e Cunge (1970). As células são compartimentos articulados, capazes de representar a superfície da bacia, incluindo a rede de drenagem. Esses compartimentos têm capacidade de armazenagem e apresentam características topográficas e de uso do solo que permitem um processo de transformação chuva-vazão. A integração destes compartimentos forma uma rede de escoamentos e é responsável pela representação física da bacia e dos elementos da paisagem urbana. A interação entre as células se faz por meio de diferentes leis hidráulicas, com destaque para as equações completas de Saint-Venant, incluindo ainda vertedouros e orifícios clássicos, estruturas típicas de drenagem e bombeamento, entre outros.

O modelo é definido como quasi-bidimensional, mas ainda articula, verticalmente, o plano das galerias subterrâneas. Dessa forma, o MODCEL tem capacidade de representar de forma eficiente a topologia urbana, conforme destacado por Sousa *et al.* (2022), sendo amplamente utilizado em estudos e projetos pela sua habilidade de simular com precisão sistemas de drenagem urbana complexos e suas interações com o meio urbano.

ÁREA DE ESTUDO

O processo de ocupação da Zona Noroeste de Santos não foi acompanhado pela infraestrutura urbana necessária, resultando na ocupação de áreas naturalmente suscetíveis a inundações. Os bairros de Sabóó, Chico de Paula, São Jorge, São Manoel, Santa Maria, Bom Retiro, Rádio Clube, Areia Branca, Caneleira e Jardim Castelo são habitados predominantemente por populações de baixa renda. As bacias hidrográficas locais são caracterizadas por áreas muito planas e baixas, sujeitas a refluxo das marés nos sistemas de drenagem, com lançamentos em região estuarina, o que agrava os problemas de alagamento.

A Zona Noroeste tem cerca de 12 km², sendo quase 30% da área suscetível a alagamentos, tanto por chuvas intensas quanto por marés elevadas nos pontos mais críticos. Boa parte da área foi construída sobre terrenos aterrados, com cotas próximas ao nível do mar, e, em alguns trechos, até 1 metro abaixo das áreas urbanas circunvizinhas, criando um ambiente favorável ao acúmulo de água (PMS, 2022).

As principais redes de drenagem da área de interesse são:

- Bacia da Avenida Jovino de Melo
- Bacia do Rio Saboó / Lenheiros
- Bacia de Drenagem dos bairros Castelo (Santos) e Jardim Guassu (São Vicente)
- Bacia de Drenagem Dersa / Alemoa
- Drenagem do bairro São Manoel
- Drenagem da Avenida Faria Lima

Estas bacias estão representadas de forma simplificada na Figura 1.

Figura 1- Bacias de Drenagem Analisadas.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

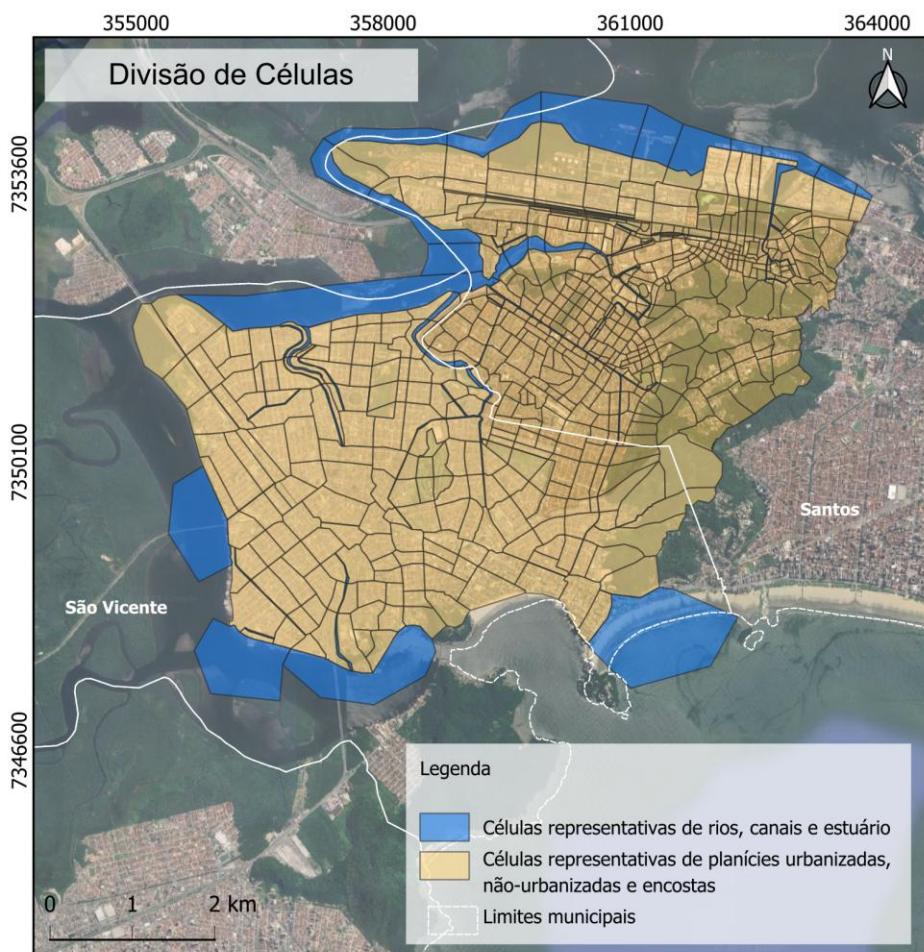
Construção do Modelo Hidrodinâmico

Para simular o comportamento da região em eventos de inundação, considerando os efeitos combinados de chuvas intensas e variações de maré no estuário, a área de estudo foi discretizada em células de escoamento, considerando os padrões de urbanização, características topográficas e conexões hidráulicas entre as células.

Foram utilizadas imagens de satélite e informações topográficas da Secretaria de Infraestrutura e Edificações de Santos (SIEDI/PMS, 2021) em escala 1:5.000, com curvas de nível a cada 1 metro. Dados topobatimétricos de canais de drenagem foram obtidos do estudo “Estudos Hidrológicos e Hidráulicos para o Sistema de Macrodrrenagem da Zona Noroeste de Santos” (Pezzi Consultoria e Projetos, 2007). Para São Vicente, devido à falta de dados mais detalhados, foram utilizadas informações do Sistema de Informações Geográficas do Estado de São Paulo (IDE-SP).

O domínio de modelagem foi discretizado em 1.011 células de escoamento: 146 células representando rios, canais e o estuário de Santos, 628 células superficiais (representando áreas naturais, urbanizadas e encostas de morros) e 237 células de elementos de microdrrenagem (bueiros e bocas de lobo). A Figura 2 ilustra a divisão das células de escoamento superficial para a modelagem hidrodinâmica.

Figura 2- Divisão da Região de Interesse em Células de Escoamento (Superficiais).

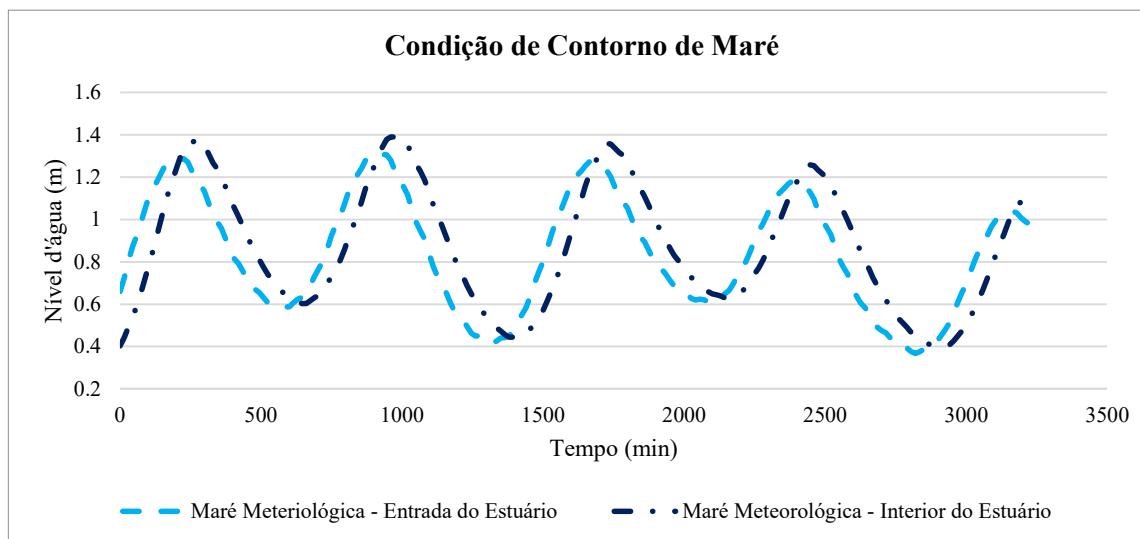


Condições de Contorno

A condição de contorno adotada considerou as variações de maré no Estuário de Santos. A região estuarina da Baixada Santista é limitada ao norte pela Serra do Mar e ao sul pelo Oceano Atlântico. Trata-se de uma planície costeira que abrange a Ilha de São Vicente, onde se localizam os municípios de Santos e São Vicente. A região conta com três principais canais de drenagem: o Canal de Santos, o Canal de São Vicente e o Canal de Bertioga.

A circulação hidrodinâmica na Baixada Santista é influenciada principalmente pelas marés astronômicas, além das vazões fluviais e de efeitos meteorológicos. Para representar os níveis de água no Estuário de Santos, foram consideradas duas curvas de maré: uma na entrada do estuário e outra no interior do canal, conforme observado na Figura 3.

Figura 3- Curvas de maré consideradas para condição de contorno.



Calibração

A fase de calibração do modelo hidrodinâmico teve como objetivo garantir a sua confiabilidade, sendo uma etapa preliminar antes de sua utilização para simulações de cenários.

Tendo em vista que a calibração não pôde contar com dados medidos simultâneos de chuva e níveis d'água, ela foi realizada a partir da comparação entre a extensão de inundação simulada e o mapa de alagamentos fornecido pela SIEDI/PMS (2021), que identifica áreas suscetíveis a alagamentos apenas por maré (níveis em torno de 1,30m) e por combinação de maré e chuvas intensas (níveis próximos a 1,70m).

Foram considerados dois cenários de simulação:

- **Cenário 1:** Maré meteorológica sem ocorrência de chuva intensa;
- **Cenário 2:** Maré meteorológica combinada com evento de chuva intensa com período de retorno de 10 anos.

A Figura 4 apresenta a extensão da inundação simulada para o Cenário 1, comparada com os locais de alagamento observados durante o evento de maré meteorológica, com base em ocorrências reportadas por veículos de imprensa e no plano elaborado pela Secretaria de Infraestrutura e Edificações – Prefeitura Municipal de Santos (SIEDI/PMS, 2021), utilizado como informação de referência para a calibração. Essa análise foi concentrada no domínio de modelagem em Santos, uma

vez que não estavam disponíveis dados de calibração para São Vicente. A Figura 5, por sua vez, mostra a extensão da inundação simulada para o Cenário 2, comparada com os locais de alagamento observados durante a combinação de maré meteorológica e chuva intensa. Ressalta-se que o modelo calibrado, considerando o Cenário 2, foi inicialmente utilizado para simular a situação atual.

A comparação entre as áreas de inundação simuladas, considerando chuva intensa com período de retorno de 10 anos, indicou boa correspondência com os dados municipais. Além disso, a análise de relatos de alagamentos na mídia digital trouxe informações complementares para a espacialização das áreas alagadas. Embora a calibração tradicional não tenha sido possível, a validação com os dados existentes aumentou a confiança nos resultados do modelo.

Figura 4 - Mapeamento da situação atual de alagamentos para o Cenário 1.

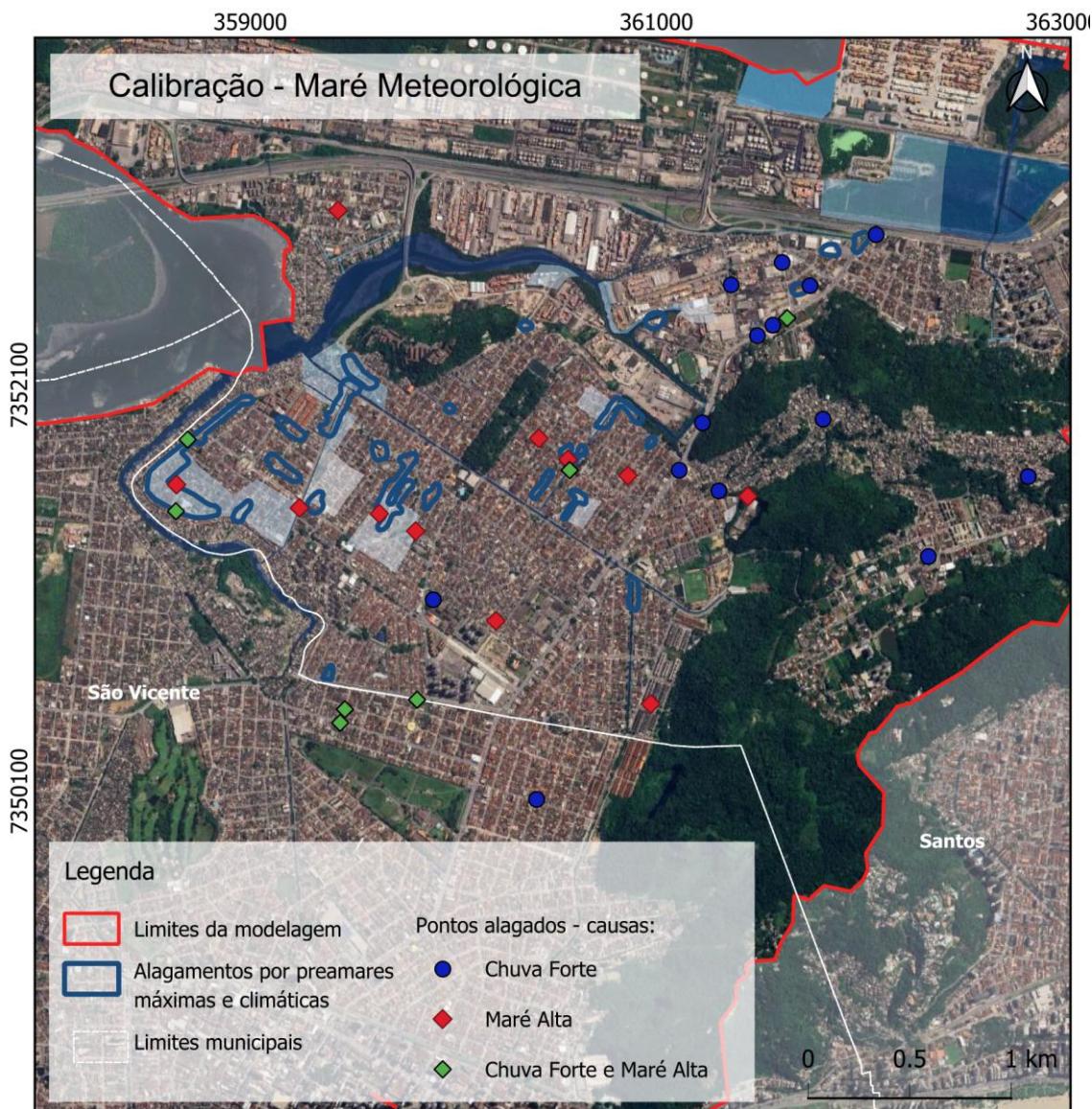
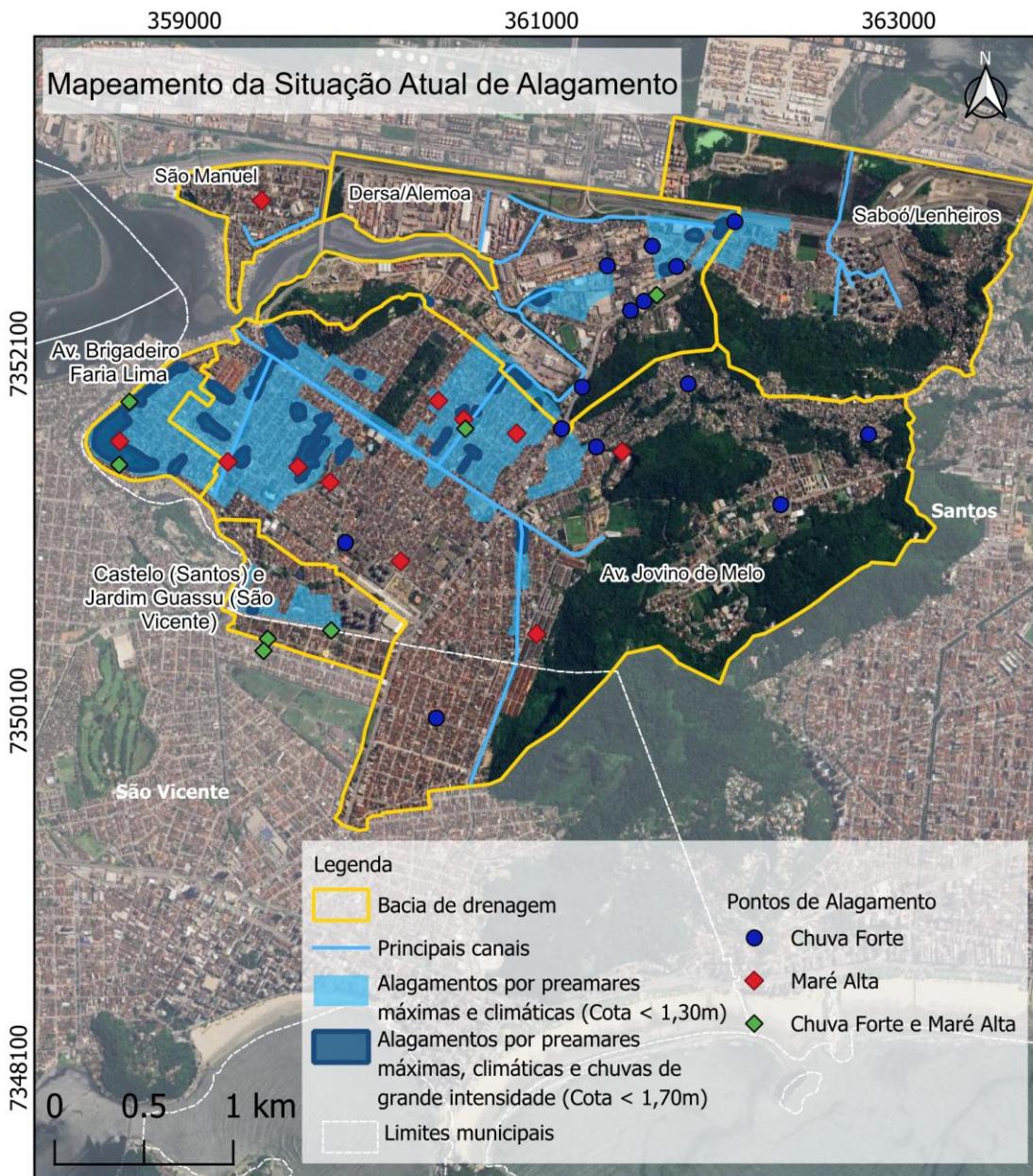


Figura 5 - Mapeamento da situação atual de alagamentos para o Cenário 2.



CONCLUSÕES

Este trabalho focou no desenvolvimento de um estudo hidrodinâmico, envolvendo a criação e calibração de um modelo matemático para representar espacialmente as inundações na cidade de Santos, integrado a um processo hidrológico simplificado de transformação de chuva em vazão. Esse tipo de modelagem permite simular o escoamento superficial pelas ruas, considerando a captura e condução pelas redes de micro e macrodrenagem, além de possibilitar a identificação de falhas nos sistemas, gerando conhecimento prático sobre os padrões de inundaçao.

O estudo conseguiu identificar as áreas críticas de alagamento em Santos, oferecendo uma base técnica para futuras melhorias na infraestrutura de drenagem. Esta base de modelagem é fundamental para a avaliação de propostas de projeto, especialmente considerando as dificuldades associadas ao

controle de inundações em áreas de baixada sujeitas a refluxo. É importante evitar a transferência de alagamentos para locais indesejados, como os pátios operacionais do Porto de Santos.

A abordagem sistêmica proporcionada pela modelagem de toda a região representa um primeiro passo no apoio ao desenvolvimento de projetos de engenharia para controle de inundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira, sediada na UFRJ.

REFERÊNCIAS

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. Simulação de inundações urbanas utilizando o MODCEL Urban flood simulation using MODCEL—an alternative quasi-2D conceptual model. *Water* (Switzerland), v. 9, n. 6, p. 445, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9060445>.

PEZZI CONSULTORIA E PROJETOS. Estudos Hidrológicos e Hidráulicos para o Sistema de Macrodrrenagem da Zona Noroeste de Santos. [S.l: s.n.], 2007.

SIEDI/PMS. Levantamento do Sistema de Macrodrrenagem de Santos: Galerias, Canais, Comportas, Estações e Áreas de Alagamentos por Preamares Máximas, Climáticas e Chuvas de Grande Intensidade. Escala 1:5.000. Santos, SP: [s.n.], 2021.

SOUSA, M. M.; DE OLIVEIRA, A. K. B.; REZENDE, O. M.; DE MAGALHÃES, P. M. C.; PITZER JACOB, A. C.; DE MAGALHÃES, P. C.; MIGUEZ, M. G. Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation. *Journal of Hydroinformatics*, v. 24, n. 5, p. 976–991, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.174>.

ZANOBETTI, D., LORGERÉ, H., PREISSMANN, A., CUNGE, J. A.. "Mekong delta mathematical model program construction", *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, v. 96, n. 2, p. 181–199, 1970.