AVALIAÇÃO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS EM ESCALA LOCAL PARA PREVISÃO DE NÍVEL DO MAR NA BAÍA DE SANTOS E NO INTERIOR DO ESTUÁRIO

EVALUATION OF LOCAL SCALE HYDRODYNAMIC MODELS FOR SEA LEVEL FORECASTING IN SANTOS BAY AND WITHIN THE ESTUARY

Gustavo Silva Nusch, Kauê Leocádio Gomes, Regina de Souza Ferreira, Alexandra Franciscatto Penteado Sampaio, Vinícius Santos Pessanha, Matheus Souza Ruiz.

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: nuschh05@gmail.com

RESUMO – As mudanças climáticas têm intensificado a frequência e a magnitude dos eventos extremos, como ondas e marés altas na Baía de Santos. Este estudo realiza uma análise comparativa de três modelos numéricos locais de previsão de nível do mar na Baía de Santos e no interior do estuário: Mohid, Delft3D e ADCIRC. O objetivo foi avaliar a precisão de cada modelo em simular o nível do mar, bem como a maré astronômica e maré meteorológica, utilizando dados de 2023. Foram aplicadas métricas estatísticas, como Viés, RMSE, Willmott Skill Score e correlação. Os resultados mostram que todos os modelos apresentam bom desempenho na previsão do nível do mar na Baía de Santos e no interior do estuário, com valores de Willmott superiores a 0,94 e RMSE inferiores a 0,21 m. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os modelos têm boa capacidade de prever e simular as variações de nível do mar na Baía de Santos e no interior do estuário, destacando-se o modelo Delft3D pela maior concordância com os dados observados, apresentando menores erros e maior correlação.

Palavras-chave: Modelos numéricos; nível do mar; Baía de Santos.

ABSTRACT – Climate change has intensified extreme events in Santos Bay, such as high waves and storm surges. This study conducts a comparative analysis of three local numerical models for sea level prediction in the Santos Bay: Mohid, Delft3D, and ADCIRC. The objective was to evaluate the accuracy of each model in simulating sea level, as well as astronomical and meteorological tides, using data from 2023. Statistical metrics such as Bias, RMSE, Willmott Skill Score, and correlation were applied. The results show that all models perform well in predicting sea level in the Santos Bay and the interior of the estuary, with Willmott values above 0.94 and RMSE below 0.21 m. Based on the obtained results, it is concluded that the models have good capability to predict and simulate sea level variations in the Santos Bay and the interior of the estuary, with the Delft3D model standing out for its greater agreement with observed data, presenting lower errors and higher correlation.

Keywords: Numerical models; sea level; Santos Bay.

Tipo do trabalho: (X) Iniciação científica ( ) Iniciação tecnológica ( ) Extensão

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário de mudanças climáticas, comunidades costeiras em todo o planeta têm sofrido inundações causadas por eventos meteoceanográficos extremos, cada vez mais frequentes e intensos (Church et al., 2013). A cidade de Santos, localizada no litoral do estado de São Paulo, destaca-se em sua área insular, como uma das cidades de maior densidade populacional do Brasil, e mais populosas do litoral de São Paulo, com aproximadamente 418 mil habitantes (IBGE, 2022). Eventos extremos de elevação do nível do mar podem impactar diretamente a vida de seus habitantes, afetando desde a rotina diária até questões mais graves de segurança e infraestrutura (Ribeiro et al., 2019). Contudo, a previsão das condições marítimas é essencial para possibilitar a mitigação dos impactos destes eventos e a implementação e gestão de estratégias de segurança, como Proteção e Defesa Civil.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de modelos numéricos em escala local na simulação e previsão de nível do mar (maré total) e de suas componentes astronômica e meteorológica, na região da Baía de Santos e no interior do estuário. A componente astronômica refere-se às variações causadas pelas forças gravitacionais da Lua e do Sol (Pugh, 1987), enquanto a componente meteorológica está relacionada às variações induzidas por fatores atmosféricos, como pressão e vento (Campos et al., 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foram utilizados os dados de nível do mar registrados pela rede de monitoramento da Praticagem de São Paulo (SPPilots) para as estações Praticagem e Barnabé (Figura 1), durante todo o ano de 2023. Foram utilizados os resultados do modelo numérico hidrodinâmico ADCIRC, fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, e também dos modelos numéricos hidrodinâmicos – Mohid (Ribeiro et al., 2019) e Delft3D-FLOW (Ruiz et al., 2021) – processados operacionalmente pelo Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília (NPH-UNISANTA).

A avaliação dos modelos se deu através de gráficos de dispersão e séries temporais, bem como da aplicação dos parâmetros estatísticos Viés, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Correlação de *Pearson* (CC) e *Willmott Skill Score* (WILLMOTT), proporcionando uma avaliação abrangente do desempenho dos modelos numéricos (Buckley et al., 2004; Steyn e Mckendry, 1998; Willmott, 1982).

Figura 1: Localização geográfica dos pontos analisados, considerando a região da baía de Santos (estação Praticagem) e do interior do estuário (estação Barnabé).



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Figuras 2 e na Tabela 1 abaixo, demonstram o desempenho geral dos três modelos avaliados, com WILLMOTT superior a 0,95 (0,94) na estação Praticagem (Barnabé) e RMSE inferior a 0,15 m (0,21 m). Esses números indicam que os três modelos conseguem reproduzir com boa precisão a variação de nível do mar na região da Baía de Santos e também na região interior do Estuário de Santos. Entretanto, observa-se que o Delft3D apresenta maior concordância com os dados observados, com menor dispersão, maiores valores de CC e WILLMOTT e menor RMSE em relação aos modelos Mohid e ADCIRC.

Figura 2: Diagrama de Dispersão de Nível do Mar (maré total, em metros), na linha superior a estação Praticagem e na linha inferior a estação Barnabé, para os modelos Mohid ("A" e "D"), Delft3D ("B" e "E") e ADCIRC ("C" e "F"), em comparação com os dados medidos pela rede de sensores da Praticagem de São Paulo.

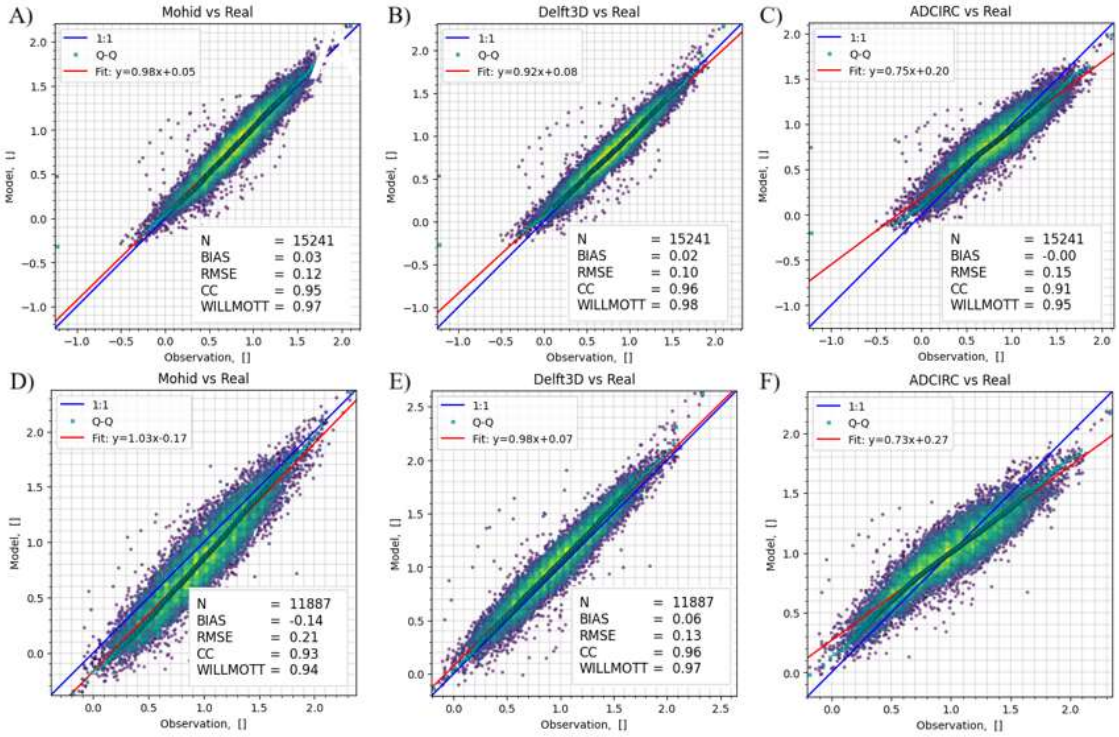


Tabela 1: Avaliação dos modelos numéricos Mohid (MHD), Delft3D (D3D) e ADCIRC (ADC) na representação de nível do mar, maré astronômica e maré meteorológica, através dos índices estatísticos, para as estações Praticagem e Barnabé.

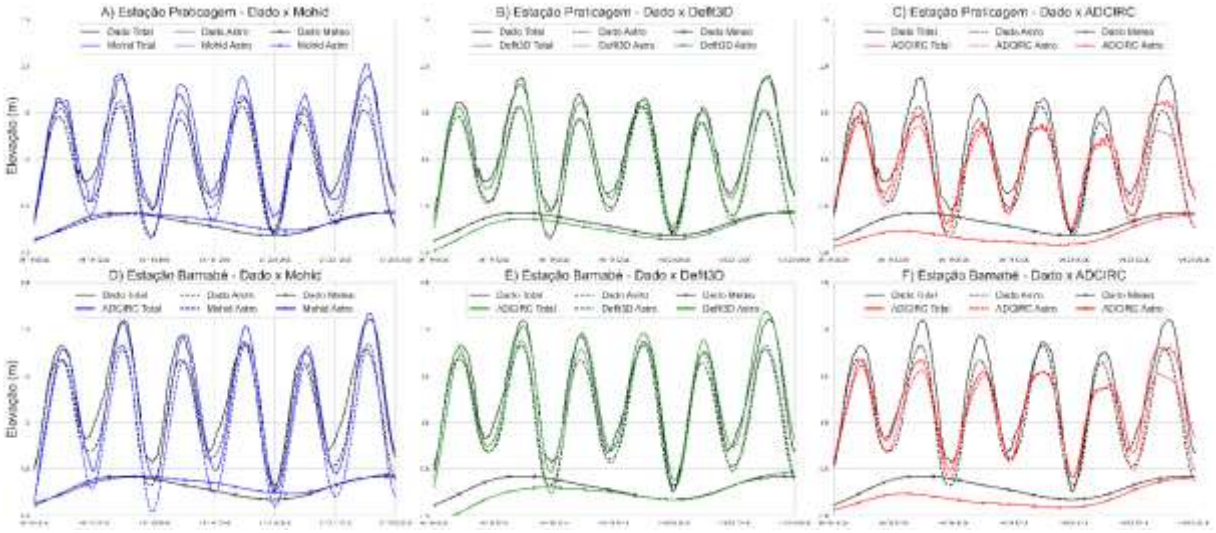
Índice		**BIAS**			**RMSE**			**CC**			**WILMOTT**		
Maré	Estação	MHD	D3D	ADC	MHD	D3D	ADC	MHD	D3D	ADC	MHD	D3D	ADC
Astro	Prat.	0,030	0,016	**-0,006**	0,081	**0,054**	0,112	0,979	**0,988**	0,945	0,986	**0,993**	0,964
	Barn.	-0,135	0,059	**0,001**	0,185	**0,087**	0,128	0,955	**0,985**	0,943	0,942	**0,985**	0,958
Meteo	Prat.	-0,001	**0,000**	0,003	**0,064**	0,065	0,083	**0,939**	0,934	0,897	0,963	**0,964**	0,930
	Barn.	-0,003	-0,003	**0,002**	**0,061**	0,069	0,069	**0,936**	0,920	0,922	**0,965**	0,959	0,949
Total	Prat.	0,029	0,016	**-0,004**	0,118	**0,101**	0,154	0,953	**0,963**	0,925	0,974	**0,980**	0,945
	Barn.	-0,137	0,056	**0,003**	0,214	**0,137**	0,168	0,923	**0,950**	0,911	0,932	**0,969**	0,940

A Figura 4 apresenta os dados observados e resultados dos modelos separados em maré total, astronômica e meteorológica durante um evento de nível do mar superior a 1,8 m em relação ao MLLW[1], caracterizando o estado de Atenção de acordo com o Plano Preventivo de Defesa Civil (São Paulo, 2016). Analisando os resultados pode-se observar que o Mohid apresentou as maiores amplitudes da maré astronômica, já o ADCIRC as menores amplitudes, enquanto o Delft3D representou melhor a amplitude da maré astronômica, principalmente no interior do estuário, consequentemente apresentando melhores resultados na previsão da maré

[1] Mean Lower Low Water, ou média das baixas-mares inferiores.

total. Deste modo, nota-se que o interior do estuário devido a sua geometria e extensa planície de inundação, pode apresentar maior complexidade de previsão.

Figura 4: Variações de nível do mar durante o evento de sobrelevação de maré ocorrido em abril de 2023, na estação Praticagem (superior) e Barnabé (inferior). As linhas sólidas mostram o nível do mar, enquanto as linhas tracejadas e as marcadas com "x" mostram as componentes astronômica e meteorológica de maré, respectivamente. Nos quadros "A" e "D" o modelo Mohid, em "B" e E" o modelo Delft3D, em "C" e "F" o modelo ADCIRC.



4 CONCLUSÃO

Destaca-se, nesta publicação acerca dos dados de nível do mar, que o modelo Delft3D contém melhores configurações de parametrização, baseado em seus índices estatísticos. A acurácia do modelo sugere que aprimoramentos como ajuste de componentes de maré e forçantes meteorológicas poderiam ser implementados nos outros modelos para melhorar suas performances, que podem ser melhor explorados em estudos futuros.

Agradeço à Diretoria de Hidrografia e Navegação Marinha do Brasil pelo fornecimento dos resultados do modelo *ADCIRC* e ao NPH-UNISANTA pelo auxílio na construção da análise e por disponibilizarem os resultados de seus modelos hidrodinâmicos.

5 REFERÊNCIAS

Buckley RL, Weber AH, Weber JH. Statistical comparison of Regional Atmospheric Modelling System forecasts with observations. Meteorological Applications. 2004 Mar;11(1):67–82.

Campos RM, Camargo RD, Harari J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul. Revista Brasileira de Meteorologia. 2010; 25, 175-184.

Censo 2022 | IBGE www.ibge.gov.br. Available from: www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html

Church JA, White NJ. A 20th century acceleration in global sea-level rise. Geophysical Research Letters. 2006 Jan 6;33(1)

Pugh, D. T. Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley & Sons. 1987.

Ribeiro RB, Sampaio AFP, Ruiz MS, Leitão JC, Leitão PC. First Approach of a Storm Surge Early Warning System for Santos Region. Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options. 2019 Nov 24;135–57.

Ruiz MS, Harari J, Ribeiro RB, Sampaio AFP. Numerical modelling of storm tides in the Estuarine System of Santos, São Vicente and Bertioga (SP, Brazil). Regional Studies in Marine Science. 2021;44:101791.

São Paulo. Resolução CMIL 17-610 - Cedec, de 28 de novembro de 2016. Edita o Plano Preventivo de Defesa Civil para erosão costeira, inundações costeiras e enchentes/alagamentos causados por eventos meteorológicos-oceanográficos extremos como ressacas do mar e marés altas. São Paulo: Diário Oficial do Estado de São Paulo; 2016.

Steyn DG, Mckendry IG. Quantitative and Qualitative Evaluation of a Three-Dimensional Mesoscale Numerical Model Simulation of a Sea Breeze in Complex Terrain. Monthly Weather Review [Internet]. 1988 Oct [cited 2024 Sep 9];116(10):1914–26.

Willmott CJ. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bulletin of the American Meteorological Society [Internet]. 1982 Nov 1;63(11):1309–13.