

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS E MARÉS METEOROLÓGICAS EM SISTEMA LAGUNAR COSTEIRO: ESTUDO DE CASO EM MARICÁ-RJ**

*Lidiane dos Santos Lima<sup>1</sup>; Paulo Cesar Colonna Rosman<sup>2</sup>; Tatiana Finageiv Neder<sup>3</sup>; Daniel Villela Runkel de Sousa<sup>4</sup>; Werner Wesley de Barros<sup>5</sup>; Luisa Gonçalves dos Santos Quintanilha<sup>6</sup>;  
Gabriele dos Santos Silva<sup>7</sup>; Wendell Esteves Andrade<sup>8</sup>*

**Abstract:** This study investigates the combined impacts of extreme hydrological events and storm surges on the Maricá Lagoon System (SLM), a vulnerable coastal zone in the state of Rio de Janeiro, Brazil. The methodology integrates historical time series (2013–2023), synthetic flood hydrographs with return periods (RPs) of 10, 25, and 50 years, and hydrodynamic simulations using the SisBaHiA model. The analyses revealed seasonal patterns of storm surge, with extreme events in summer linked to sea level elevations above +0.10 m. Simulations showed that the Maricá Lagoon has limited drainage capacity, resulting in prolonged high water levels—especially under higher RPs combined with storm surges exceeding +0.13 m. Probabilistic analysis indicated that even moderate scenarios, such as RP10 combined with a +0.05 m surge, have a combined return period of 79 years, representing significant risk. The results highlight that the interaction between fluvial and oceanographic drivers amplifies impacts, requiring structural interventions, e.g., dredging, and the inclusion of compound events in land-use planning and environmental licensing. It is concluded that integrated modeling approaches are crucial to strengthening the resilience of coastal lagoon systems in the face of intensifying extreme events, demanding coordination among science, public policy, and adaptive strategies.

**Resumo:** Este estudo investiga os impactos combinados de eventos hidrológicos extremos e marés meteorológicas sobre o Sistema Lagunar de Maricá (SLM), zona costeira vulnerável do estado do Rio de Janeiro. A metodologia adotada integra séries históricas (2013–2023), hidrogramas fluviais com tempos de recorrência (TR) de 10, 25 e 50 anos, e simulações hidrodinâmicas com o modelo SisBaHiA. As análises evidenciaram padrões sazonais de maré meteorológica, com eventos extremos no verão associados a elevações superiores a +0,10 m. As simulações hidrodinâmicas indicaram que a Lagoa de Maricá possui baixa capacidade de escoamento, resultando em permanência prolongada de níveis elevados, sobretudo sob TRs mais altos combinados a marés superiores a +0,13 m. A análise probabilística revelou que mesmo cenários moderados, como TR10 combinado a maré de +0,05 m, apresentam tempo de recorrência combinado de 79 anos, caracterizando riscos significativos. Os resultados apontam que a interação entre forças fluviais e oceanográficas intensifica os impactos, exigindo intervenções estruturais, ex.: desassoreamento, e incorporação de eventos compostos no ordenamento territorial e licenciamento ambiental. Conclui-se que abordagens integradas de modelagem são importantes para fortalecer a resiliência de sistemas lagunares costeiros frente à

---

1) Afiliação: Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica – PENO/COPPE-UFRJ, Centro de Tecnologia Bloco C-209, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: [lslima@oceanica.ufrj.br](mailto:lslima@oceanica.ufrj.br)

2) Afiliação: Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica – PENO/COPPE-UFRJ, Centro de Tecnologia Bloco C-209, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: [pccrosman@poli.ufrj.br](mailto:pccrosman@poli.ufrj.br)

intensificação dos eventos extremos, demandando articulação entre ciência, políticas públicas e estratégias adaptativas.

**Palavras-Chave** – Zonas costeiras vulneráveis; Modelagem hidrodinâmica; Inundações costeiras

## INTRODUÇÃO

Zonas costeiras são particularmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, devido à combinação de pressões naturais e antrópicas. A elevação do nível do mar, o aumento da frequência de eventos extremos e a urbanização desordenada intensificam inundações, erosão e perda de serviços ecossistêmicos (Ruan *et al.*, 2024). Em cenários com gestão ambiental fragmentada, como em diversas regiões litorâneas brasileiras, torna-se necessário adotar soluções integradas que aliem modelagem numérica, previsão de extremos e planejamento adaptativo.

Sistemas lagunares rasos, como o Sistema Lagunar de Maricá (SLM), são especialmente sensíveis a interações entre marés meteorológicas e vazões intensas, devido à baixa profundidade, conectividade restrita com o mar e margens ocupadas (Bevacqua *et al.*, 2020). Nesse contexto, abordagens integradas, como a articulação entre modelos hidrológicos e hidrodinâmicos (PeiPei *et al.*, 2022), são importantes para quantificar riscos e orientar políticas públicas adaptativas.

Desta forma, este estudo visa investigar os impactos combinados de eventos hidrológicos extremos e marés meteorológicas sobre sistemas lagunares costeiros, tendo o SLM como estudo de caso. A metodologia envolve modelagem numérica acoplada, integrando dados de reanálise atmosférica-oceânica e cenários hidrológicos com diferentes Tempos de Recorrência (TRs), com foco na avaliação do comportamento hidrodinâmico do sistema sob condições críticas.

Os objetivos específicos incluem: (i) quantificar frequência e intensidade das marés meteorológicas no SLM (2013–2023); (ii) simular os impactos de cheias com TR10, TR25 e TR50; e (iii) caracterizar a situação atual do sistema frente a barreiras naturais e artificiais, subsidiando estratégias estruturais de mitigação e adaptação a cenários climáticos futuros.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo combinou a análise de séries históricas de maré meteorológica e de hidrogramas fluviais com a simulação de cenários hidrodinâmicos para o SLM, visando avaliar os impactos de eventos extremos combinados. O enfoque foi dado ao mês de janeiro, representativo do verão, e a TRs de 10, 25 e 50 anos para eventos de cheia.

### Área de Estudo

O SLM localiza-se na faixa litorânea do Estado do Rio de Janeiro (ERJ), a cerca de 50 km da capital, e é composto por corpos hídricos interligados que formam um sistema barreira-laguna desenvolvido ao longo dos períodos Pleistocênico e Holocênico. As principais lagoas são Maricá, Barra, Padre e Guarapina, destacando-se a Lagoa de Maricá, com 19 km<sup>2</sup> e profundidade máxima de 2 metros, caracterizada por fundo plano e sedimentos finos (Silvestre *et al.*, 2017; Kjerfve, 1994).

A conectividade do sistema ocorre por canais naturais e artificiais, sendo os principais o Canal da Costa e o Canal de Ponta Negra, que o liga ao oceano desde 1951. O SLM integra a Área de Proteção Ambiental das Lagoas de Maricá, regulamentada para conter os efeitos de pressões antrópicas crescentes. Apesar de sua relevância ecológica e da função como refúgio de biodiversidade, o sistema sofre com assoreamento, eutrofização e esgoto urbano, agravados por urbanização desordenada, abertura de canais e grandes empreendimentos turísticos, que afetam diretamente comunidades tradicionais (Souza, 2015).

As dinâmicas hidrossedimentares do SLM refletem a interação entre as vazões dos rios Buris, Doce, Mumbuca e Vigário, regime de ventos e marés meteorológicas, com forte sensibilidade a eventos extremos (Silvestre *et al.*, 2017). Esse contexto reforça sua importância como área estratégica para estudos sobre impactos combinados entre forçantes continentais e oceânicas, especialmente sob a influência das mudanças climáticas e da intensificação da urbanização costeira.

## Dados Utilizados

Os principais dados utilizados neste estudo compreendem séries temporais de maré meteorológica extraídas do modelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM)<sup>3</sup> (2013–2023), hidrogramas sintéticos dos rios Buris, Doce, Mumbuca e Vigário fornecidos pelo Laboratório Água e Cidade – LAC/Poli-UFRJ para os TRs de 10, 25 e 50 anos, e batimetria atualizada do SLM em 2022 no âmbito do projeto PENO-24277 "Estudo Estratégico para Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar do Município de Maricá: Naveabilidade, Balneabilidade Costeira e Operação Urbana Consorciada", fruto de uma cooperação técnica entre a Companhia de Desenvolvimento de Maricá (CODEMAR) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Esses insumos foram integrados em simulações hidrodinâmicas com o modelo **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental** (SisBaHiA) para avaliar os efeitos combinados de eventos extremos sobre o SLM.

### *Dados de maré meteorológica*

Foram utilizados dados de reanálise do modelo oceanográfico HYCOM para o período compreendido entre 2013 e 2023, visando caracterizar a variabilidade da elevação da superfície do mar e identificar eventos extremos de maré meteorológica que afetam o SLM (Lima *et al.*, 2020; Harari *et al.*, 2013). A metodologia consistiu no cálculo do valor médio de longo prazo da elevação da superfície, estimado em -0,01 m, adotando-se limiares de  $\pm 0,05$  m para definir os intervalos de ocorrência de maré meteorológica. Foram classificados como eventos extremos os episódios em que a elevação da superfície superou os limites estabelecidos. A análise envolveu a quantificação da frequência anual e sazonal desses eventos, além da avaliação da intensidade média anual e da probabilidade de ocorrência para diferentes limiares (-0.05, 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20 m). Os resultados foram sistematizados por meio de histogramas, curvas de probabilidade e mapas mensais de distribuição temporal, evidenciando padrões sazonais e frequência de ocorrência.

### *Vazões fluviais e hidrogramas*

As condições hidrológicas dos principais tributários do SLM foram representadas por hidrogramas sintéticos dos rios Buris, Doce, Mumbuca e Vigário, fornecidos pelo Laboratório Água e Cidades (LAC/Poli-UFRJ) no contexto do projeto PENO-24277. Esses hidrogramas foram produzidos para diferentes TRs – 10, 25 e 50 anos (Figura 1), simulando cenários de cheia compatíveis com eventos hidrológicos extremos característicos da região.

Os dados utilizados foram ajustados ao intervalo de 5 a 7 de janeiro de 2023, período que coincide com a ocorrência documentada de maré meteorológica, permitindo a avaliação dos efeitos combinados sob condições representativas e controladas. Ressalta-se que, nesse intervalo, foram registradas 30 ocorrências relacionadas a desastres hidrológicos pela Defesa Civil de Maricá<sup>4</sup>, evidenciando a criticidade das condições hidrometeorológicas. O alinhamento temporal entre o pico das vazões fluviais e as elevações do nível lagunar, induzidas por forçantes oceânicas, possibilitou a

3) <https://www.hycom.org/>

4) [Maricá entra em estágio de atenção e Defesa Civil registra cerca de 30 ocorrências | Região dos Lagos | G1](#)

simulação de cenários hidrodinâmicos significativos, nos quais a sobreposição dos aportes de água doce e da maré meteorológica amplia o risco de inundações no entorno do sistema lagunar.

Figura 1 - Hidrogramas de vazões fluviais para os rios Buris, Doce, Mumbuca e Vigário, fornecidos pelo LAC/Poli-UFRJ. (a), (b) e (c) mostram a magnitude das vazões ( $m^3/s$ ) para os cenários de Condição de Cheia com TRs de 10, 25 e 50 anos, respectivamente, utilizados como entradas no modelo hidrodinâmico. (d) representa o hidrograma de vazões para o cenário de verão (mês de janeiro), indicando a faixa de tempo em que os cenários das Condições de Cheia (TR10, TR25 e TR50) são inseridos para a simulação.

(a)



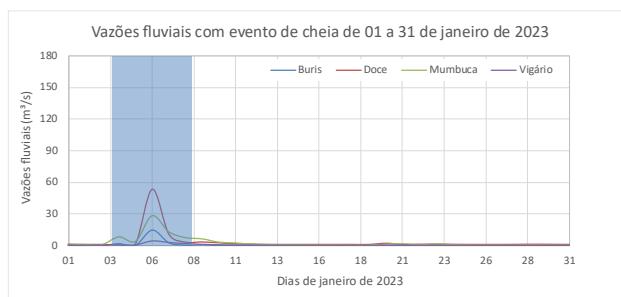
(b)



(c)



(d)



### Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica foi conduzida por meio do sistema numérico SisBaHiA<sup>5</sup>, amplamente validado para aplicações em ambientes costeiros e estuarinos (Sousa e Lima, 2024). O modelo adota uma abordagem bidimensional horizontal (2DH), resolvendo as equações de *Navier-Stokes* integradas na profundidade, com a incorporação dos principais processos físicos que regem a dinâmica de sistemas lagunares (Rosman, 2025).

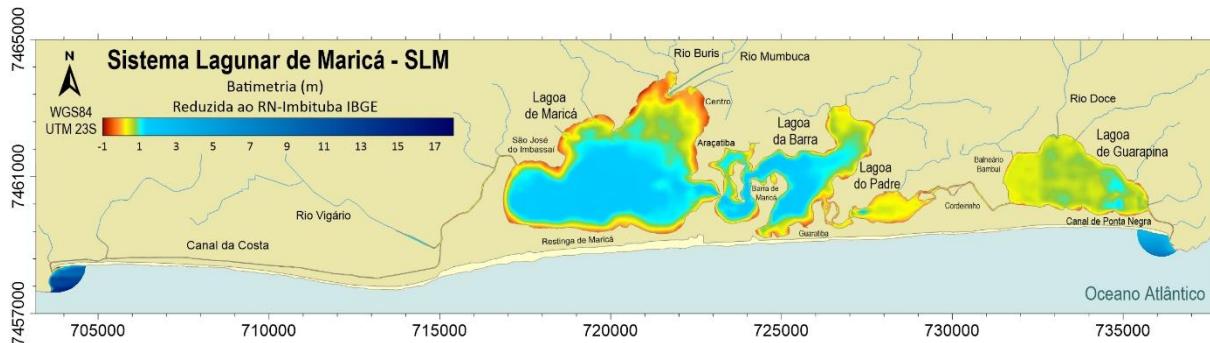
A implementação do SisBaHiA envolveu múltiplas entradas de dados: (i) modelagem digital do domínio de modelagem em elementos finitos subparamétricos triangulares e quadrangulares, através de 7887 pontos em uma malha com 1757 elementos finitos subparamétricos, sendo 1578 elementos quadrangulares e 179 triangulares; (ii) batimetria detalhada do SLM, atualizada em 2022, no contexto do projeto PENO-24277 (Figura 2); (iii) séries de maré meteorológica obtidas a partir do modelo HYCOM para o mês de janeiro de 2023; (iv) nível médio do mar adotado de acordo com a Descrição das referências de nível contidas na F41 - Padrão - ILHA FISCAL - 50140 - Versão 1/2021<sup>6</sup>, referente ao *datum* Imbituba do IBGE; (v) campos de vento atmosférico representativos do

5) <https://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>

6) F41 - Padrão - ILHA FISCAL - 50140 - Versão 1/2021

período analisado extraídos, de 6 estações, do modelo de reanálise do ERA5<sup>7</sup>, disponibilizado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF); e (vi) vazões fluviais sintetizadas em hidrogramas dos rios Buris, Doce, Mumbuca e Vigário, fornecidos pelo LAC/Poli-UFRJ (Figura 1).

Figura 2 - Mapa batimétrico do Sistema Lagunar de Maricá (SLM), apresentando as profundidades em metros (m) conforme escala de cores.



As simulações contemplaram o mês de janeiro, característico do regime chuvoso no litoral sudeste brasileiro, e incorporaram cenários de cheia com TRs de 10, 25 e 50 anos. Além disso, foi considerada a maré meteorológica máxima registrada em 5 de janeiro de 2023, com amplitude de 0,13 m, permitindo a análise do comportamento hidrodinâmico do SLM sob a atuação conjunta de forçantes fluviais e oceanográficas.

### Tempos de Recorrência Combinados

As probabilidades individuais dos eventos hidrológicos foram estimadas com base nos TRs usuais em estudos hidrológicos, TR10 (10%), TR25 (4%) e TR50 (2%), conforme diretrizes de análises de frequência de vazões (Güçlü, 2018). Para as marés meteorológicas, as probabilidades foram calculadas a partir de dados de elevação do nível do mar (2013–2023) provenientes do modelo HYCOM, com abordagem semelhante à de Gabioux *et al.* (2013). Foram definidos cinco limiares de maré ( $-0,05$  m a  $+0,20$  m), e suas frequências relativas foram calculadas para os meses de verão.

A ocorrência conjunta de cheia e maré foi estimada pelo produto das probabilidades independentes, e os Tempos de Recorrência Combinados (TRc) foram obtidos como o inverso dessas probabilidades. Embora simplificada, a abordagem está alinhada com estudos recentes (Latif & Simonovic, 2023) que recomendam a consideração de TRc na análise de riscos hidrológicos compostos. Essa metodologia oferece suporte à definição de cenários críticos em modelagens preditivas e orienta ações de ordenamento territorial, infraestrutura resiliente e estratégias de mitigação (Zhong *et al.*, 2023).

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir integram análises estatísticas, modelagens hidrodinâmicas e avaliações de recorrência de eventos extremos, com foco na compreensão dos impactos combinados de marés meteorológicas e cheias fluviais no SLM. A abordagem adotada permite avaliar a resposta hidrodinâmica do sistema frente a diferentes cenários de pressão hidrometeorológica, considerando tanto a variabilidade interanual quanto episódios críticos recentes, como o ocorrido em janeiro de 2023.

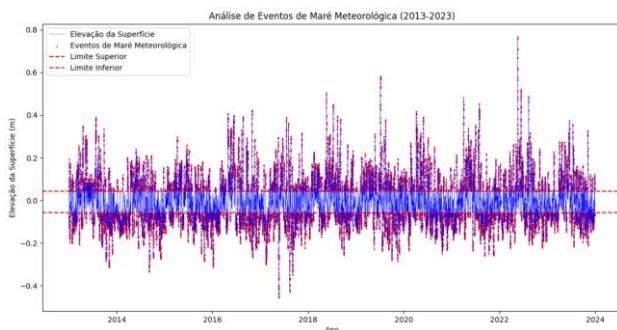
7) ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present

## Maré Meteorológica (2013–2023)

A maré meteorológica no SLM, entre 2013 e 2023, foi analisada com base em dados de reanálise do modelo HYCOM, considerando a elevação da superfície do mar em relação ao nível médio de longo prazo ( $-0,01\text{ m}$ ). Foram definidos limiares extremos a partir de desvios de  $\pm 0,05\text{ m}$  da média histórica, adotando-se como eventos aqueles que ultrapassaram esses limites (Figura 3a). A série temporal evidenciou alta sensibilidade do sistema a forçantes meteorológicas, com frequência anual entre 1.547 (2023) e 1.821 (2014) eventos (Figura 4a), mantendo-se relativamente estável ao longo da década, mas com padrão sazonal acentuado.

Figura 3 - Elevação das marés meteorológicas extraídas de reanálises no Atlântico Sul, provenientes do modelo HYCOM. (a) apresenta a série temporal da elevação das marés meteorológicas para o período de 2013 a 2023. (b) detalha a elevação das marés meteorológicas para o mês específico de janeiro de 2023. Em ambos os gráficos,   
— Limite superior;   
— Limite inferior; ● Eventos de maré meteorológica.

(a)



(b)

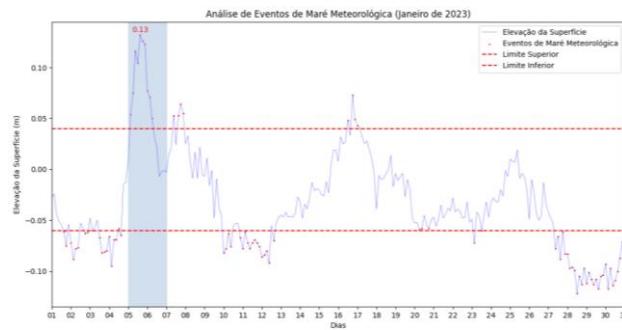
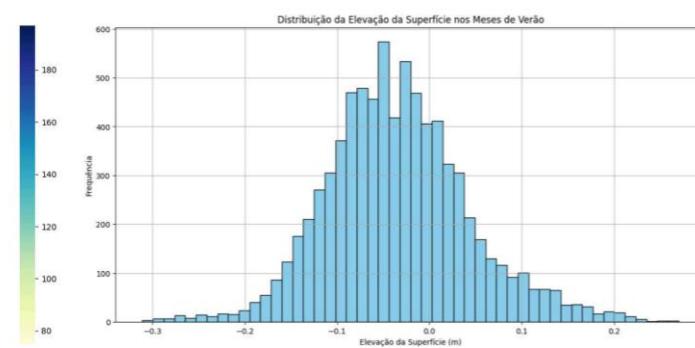


Figura 4 - Análise estatística dos eventos de maré meteorológica e elevação da superfície para o período de 2013 a 2023. (a) apresenta a distribuição mensal do número de eventos de maré meteorológica ao longo dos anos analisados. (b) ilustra o histograma da elevação da superfície durante os meses de verão (dezembro, janeiro, fevereiro e março) para o mesmo período, fornecendo uma visão da frequência de diferentes níveis de elevação.

(a)



(b)



A maior incidência ocorreu nos meses de maio e agosto, enquanto janeiro e dezembro apresentaram menor frequência. Durante o verão, 58,4% dos eventos registraram elevações inferiores a  $-0,05\text{ m}$ , enquanto marés acima de  $+0,05\text{ m}$  ocorreram com menor frequência: 12,7% ( $+0,05\text{ m}$ ), 5,7% ( $+0,10\text{ m}$ ), 2,0% ( $+0,15\text{ m}$ ) e 0,5% ( $+0,20\text{ m}$ ) (Figura 4b). Em janeiro de 2023, destacou-se um evento extremo em 5 de janeiro, com pico de  $+0,13\text{ m}$  às 15h (Figura 3b), adotado como base para

simulações hidrodinâmicas. A simultaneidade entre marés meteorológicas e cheias fluviais atua como intensificador do risco hidrológico, exigindo sua inclusão em políticas públicas de gestão costeira. Estudos recentes destacam que eventos compostos possuem impactos amplificados por interações não lineares, sendo essencial o uso de modelagem multivariada para previsão e planejamento adaptativo (Xu *et al.*, 2023; Tanim *et al.*, 2021).

### Cenários Hidrológicos e Hidrodinâmicos

A simulação da Situação Atual (SA), baseada na batimetria de 2022 sem intervenções de desobstrução, com hidrogramas de cheia para TR10, TR25 e TR50, combinados à maré meteorológica de até +0,13 m observada em 5 de janeiro de 2023. Os resultados indicam que o SLM, especialmente a Lagoa de Maricá, apresenta baixa capacidade de escoamento, com recuperação lenta e risco de inundações prolongadas em áreas urbanas adjacentes (Figura 5).

No cenário SA – MM13 + TR10, os níveis variaram entre 0,54 m e 0,95 m, e com maré de +0,04 m (MM04), entre 0,47 m e 0,80 m, demonstrando o impacto das forçantes oceânicas (Figura 6a). Para TR25, os níveis atingiram 0,99 m, mantendo-se elevados por vários dias (Figura 6b). O cenário mais crítico, SA – MM13 + TR50, registrou até 1,02 m, revelando a vulnerabilidade do sistema à atuação conjunta de forçantes hidrometeorológicas severas (Figura 6c).

Figura 5 - Localização dos pontos onde foram extraídas séries temporais de nível dos modelos hidrodinâmicos para os cenários analisados.

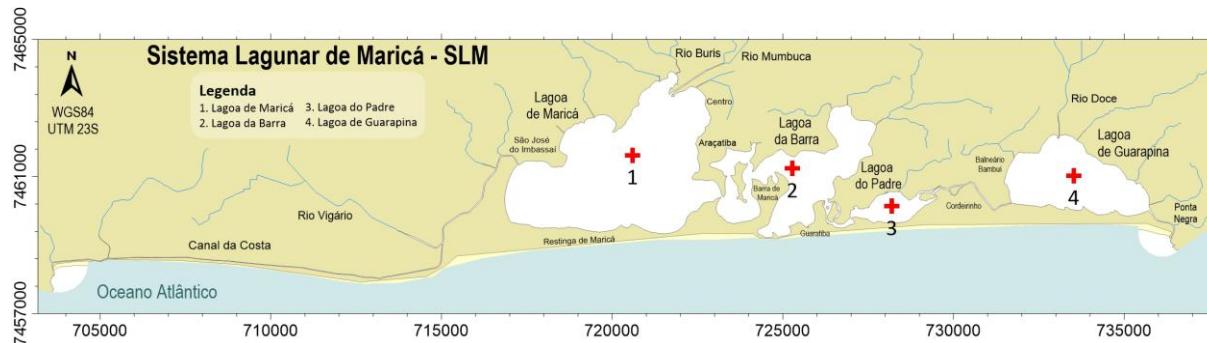
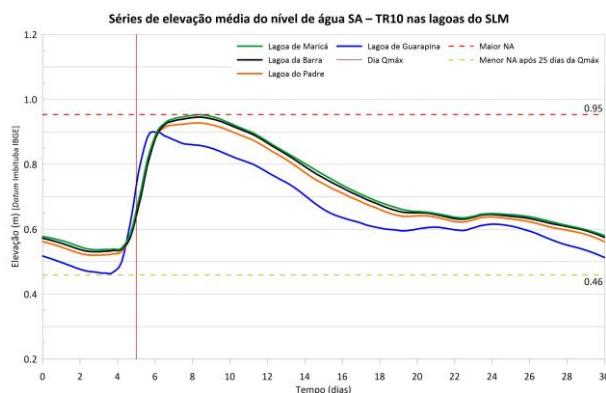
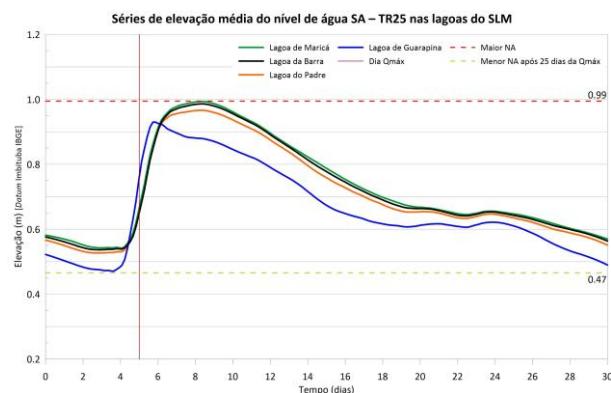


Figura 6 - Situação Atual – Diagnóstico: Séries temporais de máxima elevação do nível médio diário, isto é, sem oscilações de maré, nas Lagoas de Maricá, Barra, Padre e Guarapina, para Condição de Cheia com Tempos de Recorrências de (a) 10 anos, (b) 25 anos e (c) 50 anos. Veja posição dos pontos na Figura 5.

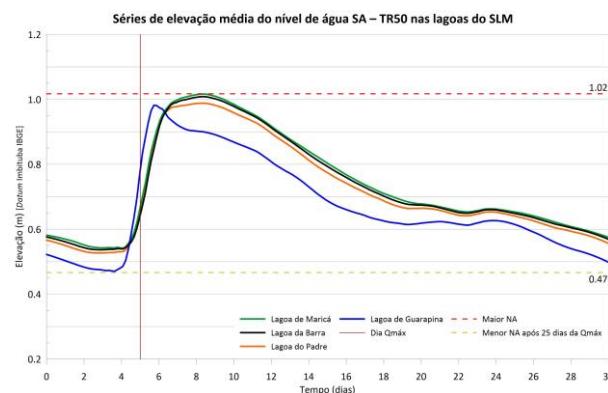
(a)



(b)



(c)



Esses resultados reforçam a limitação hidrodinâmica do SLM e a necessidade de abordagens integradas que acoplem modelagem hidrológica a modelos hidrodinâmicos costeiros (PeiPei *et al.*, 2022). Em áreas com dados escassos, técnicas de *machine learning* aplicadas a modelagem ampliam a capacidade preditiva (Sampurno *et al.*, 2022). A integração de sensores remotos, algoritmos e simulações em tempo quase real é considerada central para o planejamento adaptativo em regiões costeiras vulneráveis (Sun *et al.*, 2024).

### TR Combinado e Risco

A análise conjunta de eventos hidrológicos extremos e marés meteorológicas mostrou que, mesmo sendo estatisticamente raros em suas magnitudes mais elevadas, esses eventos representam riscos relevantes para o SLM. A metodologia baseou-se na multiplicação das probabilidades individuais associadas a diferentes TRs hidrológicos (TR10, TR25, TR50) e limiares de maré ( $-0,05$  m a  $+0,20$  m), conforme dados do modelo HYCOM (2013–2023).

Os resultados indicam que combinações moderadas, como TR10 + maré de  $+0,05$  m, apresentam TR de 79 anos, já caracterizando cenários de atenção. Eventos mais extremos, como TR50 + maré de  $+0,20$  m (TR  $> 9.300$  anos), têm baixo risco de ocorrência, mas potencial catastrófico. Cenários mais frequentes, como TR10 + maré de  $-0,05$  m (TR de 17 anos), justificam sua inclusão no planejamento urbano e na gestão de riscos costeiros.

Mesmo eventos raros, como TR50, não devem ser desconsiderados, pois a intensificação das mudanças climáticas tende a aumentar sua frequência e impacto (Bevacqua *et al.*, 2020). A persistência de cotas elevadas, como observado no SLM, compromete infraestrutura e segurança pública. Estudos regionais (Costa *et al.*, 2024) indicam que cenários climáticos extremos prolongam os picos de cheia, exigindo medidas como soluções baseadas na natureza, modelagem integrada, altimetria e sistemas de alerta (Lacerda *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2024).

### CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciam que os impactos hidrodinâmicos no SLM são ampliados pela ocorrência simultânea de eventos hidrológicos extremos e marés meteorológicas. A análise integrada de séries históricas (2013–2023) e modelagem numérica permitiu caracterizar a frequência e intensidade desses eventos, além de simular cenários hidrológicos críticos com TRs de 10, 25 e 50 anos. Mesmo combinações moderadas, como TR10 com maré de  $+0,05$  m, revelaram-se suficientes para gerar inundações de relevância, com TRc compatíveis com a escala de planejamento urbano.

A simulação da SA, considerando restrições hidrodinâmicas do sistema, mostrou a baixa capacidade de escoamento da Lagoa de Maricá, implicando em prolongada permanência de cotas

elevadas apó os eventos. Esses resultados reforçam a necessidade de intervenções estruturais, como a reabilitação da conectividade hidrodinâmicas através do desassoreamento de canais e recintos lagunares, bem como a necessidade de incorporação dos TRc nas diretrizes de ordenamento territorial e licenciamento ambiental. Como implicação prática, propõe-se: (i) a adoção de zonas prioritárias de mitigação baseadas em cenários compostos; (ii) a revisão de parâmetros de projeto de drenagem urbana para incluir TRc; e (iii) o uso de modelagens preditivas integradas como suporte à tomada de decisão. Por fim, a validação quantitativa das simulações não pôde ser realizada devido à inexistência de dados observacionais de nível d'água disponíveis para o período analisado. No entanto, a coincidência temporal entre os picos simulados e os registros de ocorrência de eventos hidrológicos extremos reportados pela Defesa Civil de Maricá em janeiro de 2023 confere respaldo qualitativo aos resultados. Conclui-se que abordagens integradas de modelagem são ferramentas importantes para fortalecer a resiliência de sistemas lagunares costeiros frente à intensificação dos eventos extremos, exigindo articulação entre ciência, políticas públicas e estratégias adaptativas.

## REFERÊNCIAS

- BEVACQUA, E.; VOUSDOUKAS, M. I.; ZAPPA, G. et al. (2020). "More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change". *Communications Earth & Environment*, 1, 47. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00044-z>
- COSTA, D. A.; BAYISSA, Y.; VILLAS-BOAS, M. D. et al. (2024). "Water availability and extreme events under climate change scenarios in an experimental watershed of the Brazilian Atlantic Forest". *Science of The Total Environment*, 174417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174417>
- GABIOUTX, M.; COSTA, V.; SOUZA, J.; OLIVEIRA, B.; PAIVA, A. (2013). "Modeling the South Atlantic Ocean from medium to high-resolution". *Brazilian Journal of Geophysics*, 31(2), pp. 229–242. <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i2.291>
- GÜCLÜ, Y. S. (2018). "Frequency analysis of low and high flows in trend". *Clean – Soil, Air, Water*, 46(3). <https://doi.org/10.1002/CLEN.201800113>
- HARARI, J.; FRANÇA, C. A. S.; CAMARGO, R. (2013). "Long-term variability of tidal and mean sea level components on the Brazilian coast". *Revista Brasileira de Geofísica*, 31(5). <https://doi.org/10.22564/RBGF.V31I5.389>
- KJERFVE, B. (1994). *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography Series.
- LACERDA, G. B. M.; SILVA, C.; PIMENTEIRA, C. A. P. et al. (2014). "Guidelines for the strategic management of flood risks in industrial plant oil in the Brazilian coast". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, pp. 761–777. <https://doi.org/10.1007/S11027-013-9459-X>
- LATIF, S.; SIMONOVIC, S. P. (2023). "Compounding joint impact of rainfall, storm surge and river discharge on coastal flood risk: An approach based on 3D fully nested Archimedean copulas". *Environmental Earth Sciences*, 82(63). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10719-9>
- LIMA, A. S.; KHALID, A.; MIESSE, T. W. et al. (2020). "Hydrodynamic and waves response during storm surges on the Southern Brazilian Coast: A hindcast study". *Water*, 12(12), 3538. <https://doi.org/10.3390/w12123538>
- PEIPEI, Y.; LAW, A. W. K.; XU, S. et al. (2022). "Assessment of compound flooding through seamless linkage of coastal hydrodynamic and inland catchment models". *Journal of Hydro-environment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.11.001>

ROSMAN, P. C. C. (2025). *SisBaHiA – Sistema Base Hidrodinâmico Ambiental: Versão 12b – Manual técnico e de referência*. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), COPPE.

RUAN, X.; SUN, H.; SHOU, W.; WANG, J. (2024). “The impact of climate change and urbanization on compound flood risks in coastal areas: A comprehensive review of methods”. *Applied Sciences*, 14(21), 10019. <https://doi.org/10.3390/app142110019>

SAMPURNO, J.; VALLAEYS, V.; ARDIANTO, R.; HANERT, E. (2022). “Integrated hydrodynamic and machine learning models for compound flooding prediction in a data-scarce estuarine delta”. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 29(3), pp. 301–315. <https://doi.org/10.5194/npg-29-301-2022>

SILVESTRE, C. P.; SILVA, A. L. C.; SILVA, M. A. M.; NETO, J. A. B.; VASCONCELOS, S. C. (2017). “Geomorfologia, sedimentação e processos atuantes na lagoa de Maricá, Rio de Janeiro”. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(2). <https://doi.org/10.20502/RBG.V18I2.1111>

SOUZA, E. M. S. (2015). “Um resort na restinga de Maricá / RJ: modernização do território e destruição da pesca artesanal em uma área de proteção ambiental”. *Espaço e Economia*, n. 6. <http://journals.openedition.org/espacoeconomia/1713>

SOUSA, D. V. R.; LIMA, L. S. (2024). “Revisão sistemática da literatura sobre a aplicação do SisBaHiA® nos primeiros 24 anos: avanços e perspectivas”. In: *Anais do II FluHidros & XVI ENES*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/239/II-FLUHIDROS0056-1-0-20240801-152440.pdf>

SUN, H.; ZHANG, X.; RUAN, X.; JIANG, H.; SHOU, W. (2024). “Mapping compound flooding risks for urban resilience in coastal zones: A comprehensive methodological review”. *Remote Sensing*, 16(2), 350. <https://doi.org/10.3390/rs16020350>

TANIM, A. H.; YANG, Z.; LIU, Y. (2021). “Developing a hybrid modeling and multivariate analysis framework to assess compound flooding”. *Science of The Total Environment*, 773, 145073. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125670>

XU, H.; LIANG, Q.; XIA, X.; MING, X.; ZHANG, Y. (2023). “Impact assessment of climate change on compound flooding in coastal cities”. *Journal of Hydrology*, 620, 129271. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129166>

YAN, K.; WEERTS, A.; BOVENSCHEN, T. et al. (2024). “Compound flood forecasting and climate adaptation Destination Earth digital twin”. In: *EGU General Assembly 2024*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-7534>

ZHONG, M.; XIAO, L.; LI, X.; MEI, Y.; JIANG, T.; SONG, L.; CHEN, X. (2023). “A study on compound flood prediction and inundation simulation under future scenarios in a coastal city”. *Journal of Hydrology*, 624, 130475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130475>

**AGRADECIMENTOS** à Companhia de Desenvolvimento de Maricá (CODEMAR) pelo financiamento do projeto e pela concessão de bolsas de estudo que viabilizaram a realização deste trabalho. Reconhece-se, igualmente, o apoio institucional e técnico dos laboratórios da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) envolvidos na pesquisa: Laboratório Água e Cidade (LAC), Laboratório de Lógica Fuzzy e Laboratório SisBaHiA. Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto “Estudo Estratégico para Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar do Município de Maricá: Naveabilidade, Balneabilidade Costeira e Operação Urbana Consorciada”, fruto de uma cooperação técnica entre a CODEMAR, representando a Prefeitura de Maricá, e a UFRJ.