

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DO IMPACTO DO AUMENTO DO NÍVEL DO MAR EM UM SISTEMA DE MACRODRENAGEM NO ESPÍRITO SANTO

Pedro Augusto da Costa Leite¹ ; Ana Paula Moni Silva² & Enrique Vieira Mattos³

Abstract: In recent decades, the world, especially Brazil, has experienced extreme rainfall events with increasing intensity and frequency, leading to more floods and inundations that cause economic, social, and environmental losses. One tool for managing macrodrainage issues is the Macrodrainage Master Plan (MMP), a fundamental public policy instrument for the long-term planning of macrodrainage systems. Evaluating the impact of rising sea levels when developing MMPs in coastal regions is essential to enable urban planning that effectively responds to climate change. This work demonstrates the importance of developing scenarios to assess the impact of rising sea levels on macrodrainage systems in the formulation of Macrodrainage Master Plans for Coastal Zones, using a case study along Espírito Santo's coastline. The proposed methodology involves hydrodynamic simulation of extreme precipitation events combined with rising sea levels for the Rio da Draga basin in Vila Velha, ES, using SOBEK software. The simulations revealed that a 25-year recurrence interval event combined with a 1.0-meter sea level rise results in an approximately ninefold increase in flooded area, with a maximum water depth of 0.80 meters at the reference point — a condition not observed in scenarios without protective infrastructure. The absence of a methodology to analyze the impact of rising sea levels in master plan development for coastal regions can lead to flawed analyses and inefficient infrastructure projects, making it crucial to consider this factor in Coastal Macrodrainage Master Plans.

Resumo: Nas últimas décadas, o Brasil enfrenta eventos pluviométricos extremos, com maior intensidade e frequência, aumentando alagamentos, inundações e prejuízos econômicos, sociais e ambientais. O Plano Diretor de Macrodrenagem (PDM) é uma ferramenta essencial para a gestão e solução dos problemas de macrodrenagem, funcionando como instrumento básico para o planejamento de longo prazo desses sistemas. Avaliar o impacto do aumento do nível do mar na elaboração do PDM em regiões costeiras é necessário para possibilitar o planejamento urbano diante das mudanças climáticas. Este trabalho demonstra a importância de desenvolver cenários que avaliem o impacto do aumento do nível do mar nos sistemas de macrodrenagem na elaboração dos PDM em zonas costeiras, por meio de um estudo de caso no litoral do Espírito Santo. A metodologia proposta utiliza simulação hidrodinâmica de eventos extremos de precipitação combinados com o aumento do nível do mar para a bacia do Rio da Draga, em Vila Velha – ES, com o software SOBEK. As simulações indicam que um evento com tempo de recorrência de 25 anos, associado ao aumento do nível do mar em 1,0 m, amplia em cerca de 9 vezes a área de inundação, com lâmina máxima de 0,80 m no ponto de referência, fenômeno não observado no cenário com obras implementadas. A ausência de metodologia para analisar o impacto do aumento do nível do mar no desenvolvimento dos PDM em áreas litorâneas pode gerar falhas e obras ineficientes, devendo ser considerada no planejamento dessas zonas.

1) Universidade Federal de Itajubá, Av. B.P.S 1303, Itajubá – MG, (35) 9 9929-3793, pedro_ija@hotmail.com;

2) Universidade Federal de Itajubá, Av. B.P.S 1303, Itajubá – MG, (35) 3629-1101, anamoni@unifei.edu.br;

3) Universidade Federal de Itajubá, Av. B.P.S 1303, Itajubá – MG, (35) 3629-1101, enrique@unifei.edu.br;

Palavras-Chave – Drenagem ; Plano Diretor de Macrodrenagem; Simulação Hidrodinâmica; Mudanças Climáticas; Nível do Mar.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo, incluindo o Brasil, tem enfrentado eventos pluviométricos extremos com maior frequência, resultando em alagamentos e inundações que causam prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Mudanças humanas têm alterado significativamente o clima das cidades, afetando seus habitantes de forma sem precedentes (LEITE et al., 2022). Esses eventos impactam principalmente áreas urbanas, onde a expansão populacional e as atividades econômicas aumentam a impermeabilização do solo.

Grupos de baixa renda, muitas vezes localizados em encostas suscetíveis a deslizamentos ou próximos a rios e córregos sujeitos a alagamentos, são os mais afetados (MARENGO et al., 2020). Para enfrentar esses desafios, o Plano Diretor de Macrodrenagem (PDM) se destaca como uma ferramenta essencial na política pública, planejando a longo prazo os sistemas de drenagem e acompanhando o crescimento urbano para garantir seu funcionamento adequado diante da crescente impermeabilização.

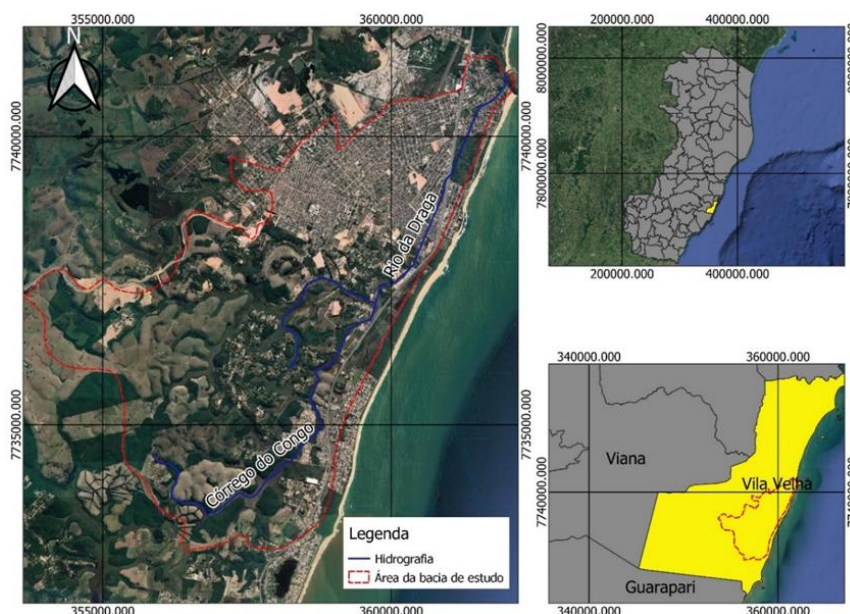
Os alagamentos urbanos geralmente resultam de falhas na infraestrutura de drenagem, seja por subdimensionamento, falta de manutenção ou aumento da impermeabilização do solo. Com as mudanças climáticas, essas falhas podem se agravar devido a chuvas intensas e limitações na saída do sistema causadas pelas marés, ampliando a extensão e a duração das inundações, afetando áreas antes não atingidas.

Diante disso, torna-se fundamental avaliar o impacto do aumento do nível do mar na elaboração dos Planos Diretores de Macrodrenagem. Este estudo de caso no litoral do Espírito Santo, baseado em dados públicos do Plano Diretor de Águas Urbanas da Região Metropolitana de Vitória (PDAU-RMGV), busca analisar os cenários desse impacto nas zonas costeiras, contribuindo para o planejamento urbano frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2. ESTUDO DE CASO

O trabalho aborda a bacia do rio da Draga, em Vila Velha, litoral do Espírito Santo, com uma área de drenagem de 33,0 km². Utilizou-se dados públicos (batimetria, uso e ocupação do solo, curve number, evento pluviométrico, estudo maregráfico e topografia) do Plano Diretor de Águas Urbanas da Região Metropolitana da Grande Vitória (PDAU – RMGV) e imagens do radar do CEMADEN em Santa Teresa – ES em seu desenvolvimento. A Figura 1 mostra a localização da área de estudo, destacando a área de drenagem e os cursos d'água envolvidos.

Figura 1 – Localização da Bacia do Rio da Draga.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para analisar o impacto do aumento do nível do mar no sistema de macrodrenagem em região costeira baseou-se na simulação hidrodinâmica de eventos extremos de precipitação combinados com o aumento do nível do mar. Para isso, foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico no software SOBEK, incorporando informações detalhadas do sistema de drenagem local.

O modelo foi calibrado com base em um evento pluviométrico registrado, comparando seus resultados com manchas de estudos prévios e imagens de satélite. Em seguida, simulou-se um evento crítico com tempo de recorrência de 25 anos, considerando a maré de calibração e as obras previstas no PDAU-RMGV para a bacia, configurando o cenário pós-desenvolvimento.

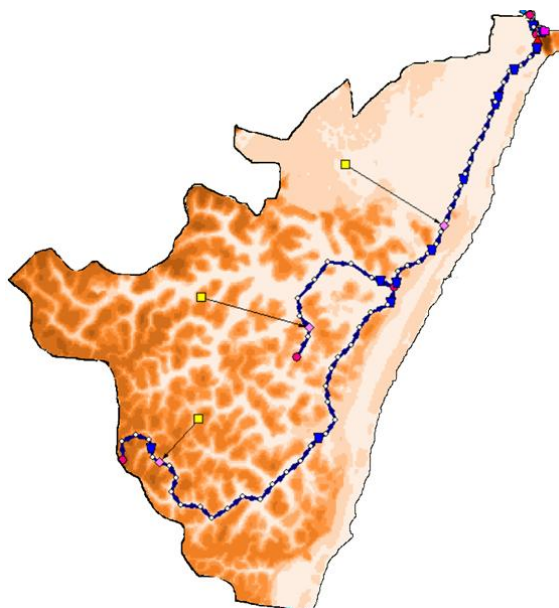
Posteriormente, foram simulados eventos críticos com diferentes tempos de recorrência, incorporando o aumento gradual do nível do mar ao incrementar os valores da maré de calibração. As manchas de inundação geradas foram comparadas para avaliar se o aumento do nível do mar provoca expansão da área inundada e elevação da altura média da lâmina d'água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

I. Calibração do modelo

A calibração do modelo foi realizada através da simulação do evento crítico no modelo SOBEK, apresentado na Figura 2, ocorrido entre 01 e 02 de março de 2020. A verificação da calibração do modelo, devido a falta de estações fluviométricas no corpo hídrico e indisponibilidade de imagens de satélite para o período do evento, foi feita através da análise de imagens de satélite de um evento crítico ocorrido em dezembro de 2013.

Figura 2 – Modelo SOBEK desenvolvido.



A seguir, na Figura 3 é apresentada a mancha de inundação do evento ocorrido em 2013 que serviu para a calibração do modelo. Posteriormente, na Figura 4 é apresentado o resultado da simulação do evento de março de 2020 para o rio da Draga.

Figura 3 – Evento ocorrido no Rio da Draga em 2013.



Figura 4 – Resultado da Simulação do Evento de Calibração.



Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que as áreas registradas pela inundação ocorrida em 2013 são similares as da mancha de inundação do evento ocorrido em 2020, que possibilitou validar a modelagem realizada.

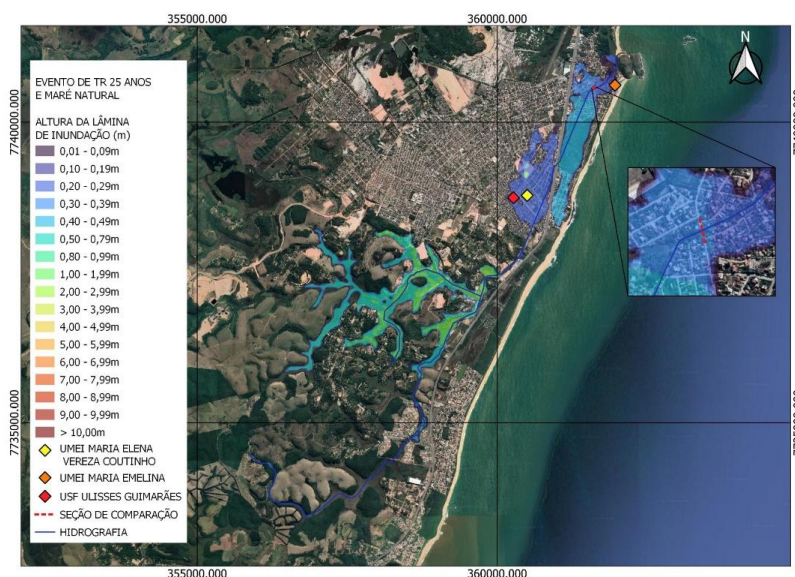
II. Cenário pré-desenvolvimento

O cenário pré-desenvolvimento refere-se a simulação de um evento crítico de tempo de recorrência de 25 anos, com altura de chuva de 195 mm discretizada pelo método de Huff, e a maré de calibração.

A Figura 5 apresenta a mancha de inundação do cenário prognóstico, onde as cores representam a altura da lâmina de inundação em metros.

Os resultados da simulação do cenário pré-desenvolvimento demonstram que algumas áreas da bacia são diretamente impactadas pelo evento crítico de cheia, sendo necessário implantar medidas visando eliminar as manchas de inundação.

Figura 5 – Mancha de inundação pré-desenvolvimento para a bacia do Rio da Draga.



III. Cenário pós-desenvolvimento

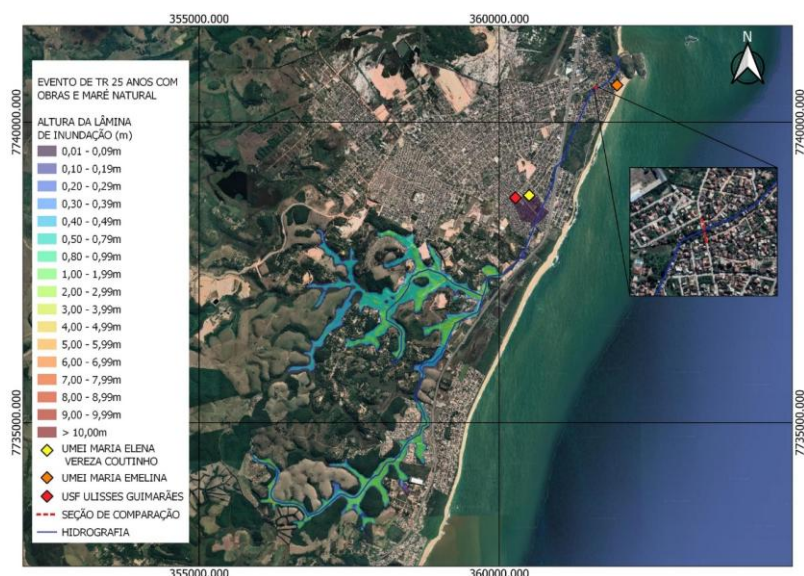
O cenário pós-desenvolvimento se refere a simulação de um evento crítico de tempo de recorrência de 25 anos, considerando a maré natural, registrada para o mesmo período do evento de calibração, com a inserção de uma intervenção visando eliminar as manchas em áreas urbanas.

Para a bacia em estudo verificou-se que o aumento da condutividade no trecho urbano, através da limpeza e a regularização da calha em um trecho de aproximadamente 3.800 metros, diminui as manchas de inundação. A intervenção proposta diminui o coeficiente de Manning de 0,05 para 0,02, compatível com revestimento de gabião, de acordo com a classificação de CHOW (1959).

A Figura 6 apresenta o resultado da mancha de inundação do cenário pós-desenvolvimento.

Através dos resultados da simulação do cenário pós-desenvolvimento, é possível perceber que houve uma redução da área de inundação e da altura da lâmina inundada nas áreas remanescentes urbanizadas, demonstrando a eficiência da proposição para a bacia em estudo.

Figura 6 – Mancha de inundação para o cenário pós-desenvolvimento.



IV. Cenários com elevação do nível do mar

A partir do cenário pós-desenvolvimento, considerou-se o aumento do nível do mar e, ou, eventos críticos de tempo de recorrência diferentes, visando avaliar o impacto do aumento do nível do mar nos sistemas de macrodrenagem.

Assim, foram simulados 4 cenários de eventos críticos considerando diferentes elevações do nível do mar:

- Cenário 01: simulação referente ao cenário pós-desenvolvimento, considerando a maré natural aumentada em 0,5 m.
- Cenário 02: simulação referente ao cenário pós-desenvolvimento, considerando a maré natural aumentada em 1,0 m.
- Cenário 03: simulação referente ao evento de tempo de recorrência de 10 anos com 164,4 mm de altura de chuva, considerando a maré natural.
- Cenário 04: simulação referente ao evento de tempo de recorrência de 10 anos considerando a maré natural aumentada em 1,0 m.

A Figura 7 a seguir apresenta o resultado da simulação do cenário 01, referente ao evento de TR25 anos e maré aumentada em 0,5 m. A Figura 8 a seguir apresenta o resultado da simulação do cenário 02, referente ao evento de TR25 anos e maré aumentada em 1,0 m. A Figura 9 a seguir apresenta o resultado da simulação do cenário 03, referente ao evento de TR10 anos e maré natural. A Figura 10 a seguir apresenta o resultado da simulação do cenário 04, referente ao evento de TR10 anos e maré aumentada em 1,0 m.

Figura 7 – Mancha de inundação para TR 25 anos e com maré aumentada em 0,50 m – Cenário 01.

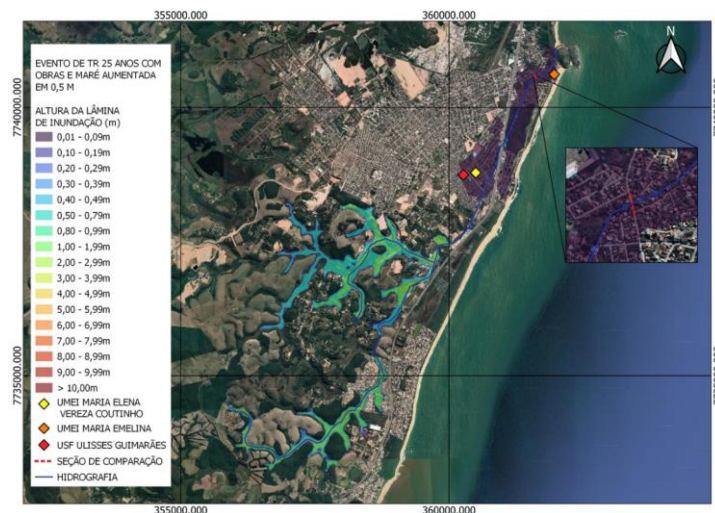


Figura 8 – Mancha de inundação para TR 25 anos e com maré aumentada em 1,0 m – Cenário 02

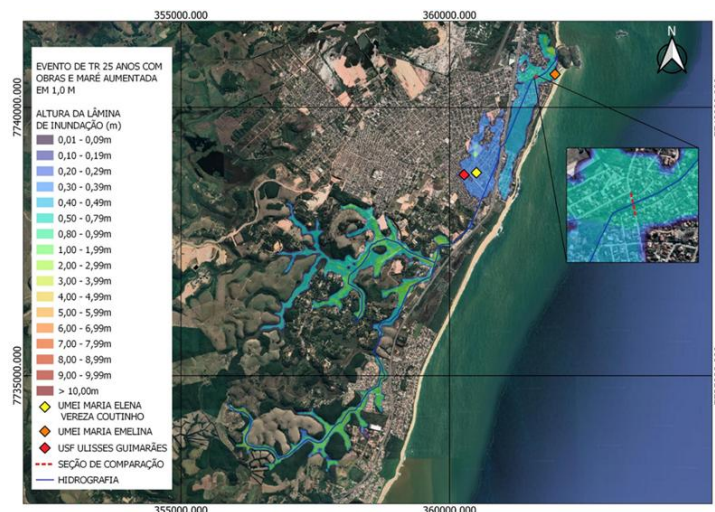


Figura 9 – Mancha de inundação para TR 10 anos e com maré natural – Cenário 03.

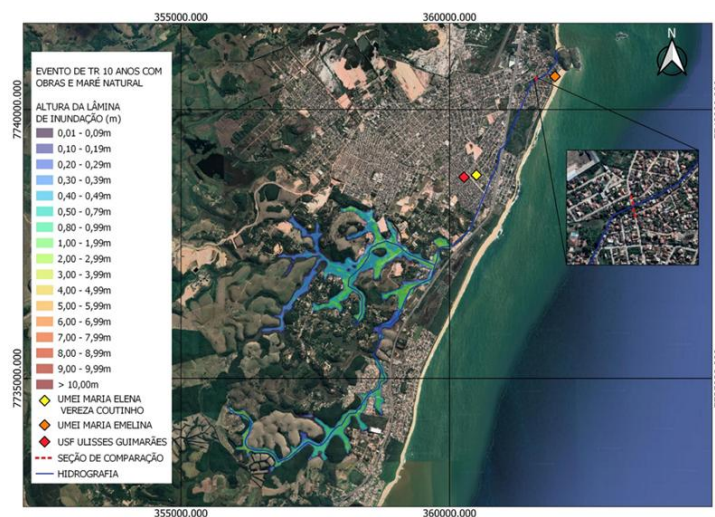
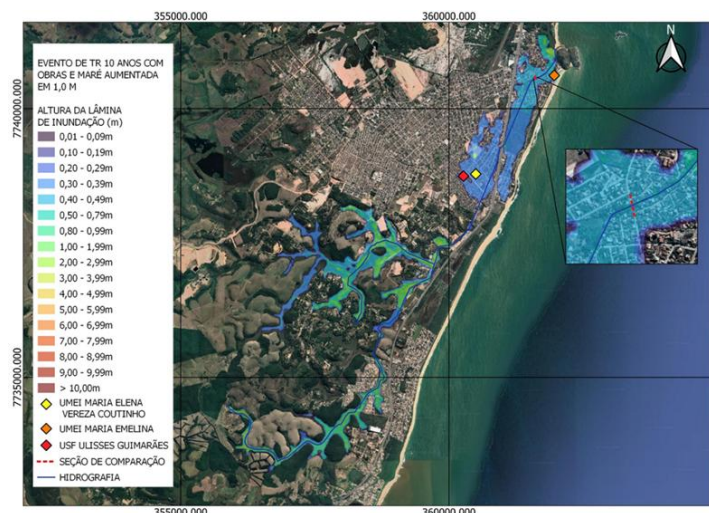


Figura 10 – Mancha de inundação para TR 10 anos e com maré aumentada em 1,0 m – Cenário 04.



Na Figura 7, o aumento do nível do mar em 0,5 m gera manchas de inundação de até 9 cm na área urbanizada da bacia. Na Figura 8, com aumento de 1,0 m, as manchas são maiores, atingindo UMEIS e USF com lâminas de até 0,29 m e 0,69 m, respectivamente. A Figura 9 não mostra manchas de inundação na área urbana, pois o evento simulado tem tempo de recorrência inferior ao considerado para a obra no cenário pós-desenvolvimento. Porém, na Figura 10, o evento de TR 10 anos com aumento do nível do mar em 1,0 m gera manchas semelhantes ao cenário pré-desenvolvimento, sem intervenções. A Tabela 1 resume essas comparações, evidenciando as diferenças entre o cenário pós-desenvolvimento e os cenários simulados quanto à área da mancha de inundação e altura da lâmina máxima.

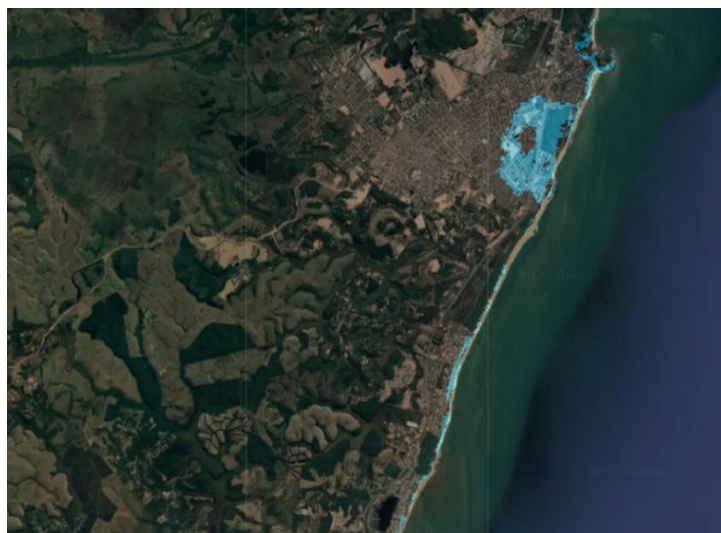
Tabela 1 – Comparação entre o cenário pós-desenvolvimento e os cenários simulados.

Parâmetro	Cenário Pós - Desenvolvimento	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04
Área da mancha de inundação em região urbana (km ²)	0,19	1,62	1,95	0	1,94
População atingida estimada	432	3.560	4.338	0	4.316
Altura da lâmina máxima no ponto de referência (m)	0,10	0,10	0,80	0,00	0,50

Os resultados da Tabela 1 mostram que um evento com tempo de recorrência de 25 anos, associado ao aumento do nível do mar em 0,50 m (cenário 01 – Figura 7), provoca aumento expressivo na área de inundação, cerca de 7 vezes maior que o cenário pós-desenvolvimento, com lâmina máxima de 0,10 m no ponto de referência, inexistente no cenário base. No cenário 02, com aumento do nível do mar em 1,0 m, a área inundada é aproximadamente 9 vezes maior, com lâmina máxima de 0,80 m (Figura 8). No cenário 03, evento de 10 anos sem aumento do nível do mar não causa inundação na

área urbana (Figura 9). Já o cenário 04, combinando evento de 10 anos com aumento do nível do mar em 1,0 m, amplia a área de inundação em cerca de 9 vezes, com lâmina máxima de 0,50 m (Figura 10). Essas análises evidenciam o impacto direto do aumento do nível do mar nas inundações costeiras, onde a maré atua como barreira, impedindo o escoamento e elevando níveis a montante. No planejamento urbano, o Plano Diretor de Macrodrenagem, com horizonte de várias décadas, está sujeito aos impactos das mudanças climáticas, tornando essencial sua análise para garantir eficiência. LEITE et al. (2022) mostraram aumento de até 13% em chuvas extremas em regiões litorâneas do Espírito Santo ao longo de duas décadas. Estudo global da Climate Central (2023) aponta que a região do rio da Draga terá inundações crescentes com aumento do nível do mar entre 0,50 m e 1,0 m até 2030 (Figura 11), confirmando a necessidade de atenção especial às áreas costeiras diante das projeções climáticas.

Figura 11 – Mancha de inundação referente ao aumento do nível do mar em 1,0 m na região do Rio da Draga (Climate Central, 2023).



Apesar de que a metodologia utilizada pelo Climate Central não considere a ocorrência de um evento pluviométrico extremo, verifica-se que o aumento do nível do mar será responsável por inundar áreas urbanas da bacia do rio da Draga mesmo quando não associado a um evento crítico. Além disso, verifica-se que o aumento do nível do mar considerado no estudo aqui desenvolvido de 1,0 m, de acordo com o Climate Central, acontecerá em meados de 2030, ou seja, um período inferior ao horizonte de projeto do PDAU-RMGV que foi avaliado para o ano de 2040.

5. CONCLUSÃO

A elaboração de Planos Diretores de Macrodrenagem oferece diversos benefícios à população, possibilitando intervenções que reduzem os impactos econômicos, ambientais e sociais das inundações. Contudo, há uma lacuna metodológica na análise do impacto do aumento do nível do mar nos sistemas de macrodrenagem em áreas litorâneas. Para esses locais, é fundamental que, após a simulação das intervenções propostas, sejam realizadas simulações adicionais considerando o aumento do nível do mar, a fim de verificar a eficácia das obras diante dessas mudanças.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para a elaboração de Planos Diretores de Macrodrenagem em zonas costeiras, baseado na análise do Termo de Referência do Ministério das Cidades (2011) e em planos já desenvolvidos, aplicado a uma bacia hidrográfica no

litoral do Espírito Santo, utilizando o software SOBEK. A ausência dessa metodologia pode levar a falhas nas análises e à execução de obras ineficientes. Simulações que incorporam o aumento do nível do mar permitem um planejamento antecipado e diferenciado, considerando as mudanças ao longo do horizonte do projeto.

Com base nos resultados, recomenda-se que o desenvolvimento de Planos Diretores em regiões costeiras inclua: a caracterização hidrológica de eventos críticos com dados de radares meteorológicos; o estudo maregráfico das marés máximas astronômicas e meteorológicas para determinar a elevação do nível do mar, utilizando séries históricas e análise de frequência; a análise das tendências do aumento do nível do mar para o horizonte do projeto; e a avaliação da modificação dos quantis de chuvas extremas ao longo do tempo para identificar possíveis aumentos na frequência e intensidade das precipitações.

Para trabalhos futuros, sugere-se a repetição dessa análise em outras regiões litorâneas para verificar a variabilidade dos impactos das elevações do nível do mar nas inundações costeiras. Além disso, recomenda-se a elaboração de uma minuta para revisão do Termo de Referência do Ministério das Cidades (2011), incorporando as boas práticas identificadas neste estudo, para aprimorar a elaboração dos Planos Diretores de Águas Pluviais Urbanas.

6. REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério das Cidades – Termo de Referência para Elaboração de Plano Diretor de Águas Pluviais Urbanas. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br>>. Acesso em: 22 de fev. 2023.
- BURIAN, S. J.; EDWARDS, F. G. Historical Perspectives of Urban Drainage. Global Solutions for Urban Drainage, [s.n], 2012.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. Oficina de Textos, São Paulo, 2.ed. 2014.
- CLIMATE CENTRAL. Researching and communicating climate change impacts and solutions. Disponível em: < <https://www.climatecentral.org/>>. Acesso em: 05 de jun. 2023.
- CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. Anais.
- GARCIA, L.; GOMEZ, J. B.; ESCOBAR, E.; TÉLLEZ, D.; QUIJANO, N.; MARTINEZ, C.O. Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review. Advances in Water Resources, v.85, [s.n], p. 120 – 132, 2015.