

ÍNDICE DE PERIGO APLICADO A INUNDAÇÕES COM INFLUÊNCIA DE MARÉ

Benício Emanuel Omena Monte^{1}; Leonardo Romero Monteiro²; Thiago de Gois Araújo Tavares³; Juliana Andrade Campos⁴; Franciele Maria Vanelli⁵; André Luiz Lopes da Silveira⁶ & Joel Avruch Goldenfum⁷*

Resumo – O aumento do nível do mar produz uma elevação na condição de contorno a jusante no fluxo do estuário de um rio, aumentando o nível de inundação. O propósito deste trabalho foi explorar os efeitos que a maré pode causar quando ocorre um evento de inundação e do seu perigo inerente. Ocorreu um tratamento de dados preliminar para extrapolação da curva-chave e definição de vazão com tempos de retorno de 10, 25 e 100 anos de vazão. Esses dados foram usados como condição de contorno a montante, enquanto a jusante incluiu-se a cota máxima (0,67 m) e mínima (-0,40 m) de maré amortecidas no modelo hidrodinâmico 2D HEC-RAS. A similaridade das manchas potenciais de inundação para cada tempo de retorno em maré baixa e alta foi no máximo 50%. Formulou-se o índice de perigo baseado na metodologia de Stephenson (2002) e o produto dessa análise foi a influência da maré alterando significativamente a classificação de perigo (baixo, médio e alto). Ainda foi gerado um mapa de perigo final, em que o perigo alto prepondera em maré alta, e um pouco menos em maré baixa. Não se processou uma análise de frequência de marés, que gerariam mais cenários de interesse.

Palavras-Chave – Modelo hidrodinâmico 2D; Mapeamento de perigo de inundação; Remanso.

HAZARD INDEX APPLIED TO FLOODING WITH TIDE INFLUENCE

Abstract – Tide level variation creates a downstream boundary condition for river and estuaries flow increasing flooding levels. The purpose of this work was to explore the effects that the tide can cause when a flood event occurs and its intrinsic hazard. Preliminary data treatment for rating curve extrapolation was performed, and 10, 25 and 100-year flow return periods were then designed. These data is used as upstream boundary condition, while downstream boundary condition included the maximum (0,67 m) and minimum (-0,40 m) tide damped for 2D HEC-RAS hydrodynamic model. The similarity of potential flood area for each return time in low and high tide was at most 50%. The hazard index was based on Stephenson's (2002) methodology, the product of the analysis of a tide influence by changing the hazard classification (low, medium and high). A final hazard map was generated, where the high hazard preponderated at high tide, and slightly less at low tide. A tide frequency analysis was not processed, which would generate more scenarios of interest.

Keywords – 2D Hydrodynamic model; Flood hazard mapping; Backwater.

¹ Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: benicio_monte@hotmail.com

² Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: leonardoromeromonteiro@gmail.com

³ Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: thiago.tgat@gmail.com

⁴ Mestranda no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: juliana_esa@outlook.com

⁵ Mestranda no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: franvanelli@yahoo.com.br

⁶ Professor Titular IPH/UFRGS; e-mail: andre@iph.ufrgs.br

⁷ Professor Titular IPH/UFRGS; e-mail: joel@iph.ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, os riscos naturais associados aos eventos climáticos extremos, tais como inundações fluviais, alagamentos, ciclones tropicais, entre outros, têm causado perdas de vidas humanas, destruição de infraestrutura socioeconômica e dano ao meio ambiente (KRON, 2008, 2012). Nessa seara, as inundações tendem a aumentar sua frequência, intensidade e risco associado devido às mudanças climáticas (SCHOLZ e YANG, 2010) e à ocupação mal planejada das planícies de inundações, essa última, altera o fluxo do escoamento dos corpos hídricos na área, seja pela modificação inadequada dos canais ou pela construção de diques.

Em municípios próximos à costa devem ser consideradas as influências dos fenômenos que ocorrem na zona costeira. Estudos demonstram que as ondas de maré oceânicas se propagam ao longo dos estuários, aumentando os níveis dos corpos hídricos nos trechos mais baixos dos rios, quando a declividade é reduzida (KOSUTH *et al.*, 2009; GARCIA e LOÁICIGA, 2013). Além disso, o aumento do nível do mar produz uma condição limite mais alta a jusante no fluxo do estuário de um rio, refletindo em um aumento do nível de inundação (GARCIA e LOÁICIGA, 2013).

Em alguns eventos, o uso apenas de medidas estruturais é insuficiente para minimização de perdas econômicas e humanas, sendo essencial a elaboração de medidas não estruturais como instrumento de planejamento e prevenção. A partir da delimitação das áreas afetadas pela inundação podem ser elaborados mapas de perigo visando demonstrar a probabilidade e/ou magnitude do evento (MONTEIRO e KOBIYAMA, 2013). A definição de perigo refere-se a possível ocorrência futura de eventos físicos naturais ou induzidos pelo homem que podem ter efeitos adversos sobre elementos vulneráveis e expostos (CARDONA *et al.*, 2012).

Com base nesses fatos, o presente artigo tem por finalidade avaliar o índice de perigo para inundações com efeito de maré no município de Tubarão, SC, a partir de simulações hidrodinâmicas para diferentes ciclos de maré.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é composta pelo município de Tubarão, que localiza-se dentro da bacia hidrográfica do Rio Tubarão, no estado de Santa Catarina (Figura 1). A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão é dividida em quatro sub-bacias: Bacia do Rio Capivari, Bacia Braço do Norte, bacia Formadores do Rio Tubarão e bacia do Baixo Tubarão, totalizando uma área de 4.740 km².

O município possui 97.235 habitantes (IBGE, 2010) e tem um crítico histórico de inundações severas devido à sua localização na zona do baixo Rio Tubarão, ao recebimento de vazões dos afluentes cujas cabeceiras estão em regiões elevadas e leitos com alta declividade, apresentando assim uma resposta rápida aos eventos de chuva. Ainda, a urbanização de Tubarão se deu dentro da planície de inundações do rio, caracterizada pela baixa declividade do terreno neste local e pela morfologia meandrada de rios típicos de planície. Os usos do solo dentro do município são compostos por 36,77% de floresta, 21,78% de campo e lavoura, 31,66% de rizicultura, 0,77% de solo exposto, 0,47% de hidrografia e 8,55% de urbanização.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada nesse trabalho seguiu as seguintes etapas: (a) obtenção de dados de vazão e tempo de retorno; (b) simulação hidrodinâmica; (c) mapeamento do perigo de inundação; (d) confrontação dos resultados do mapeamento de perigo com influência de maré baixa e alta a fim de promover discussões.

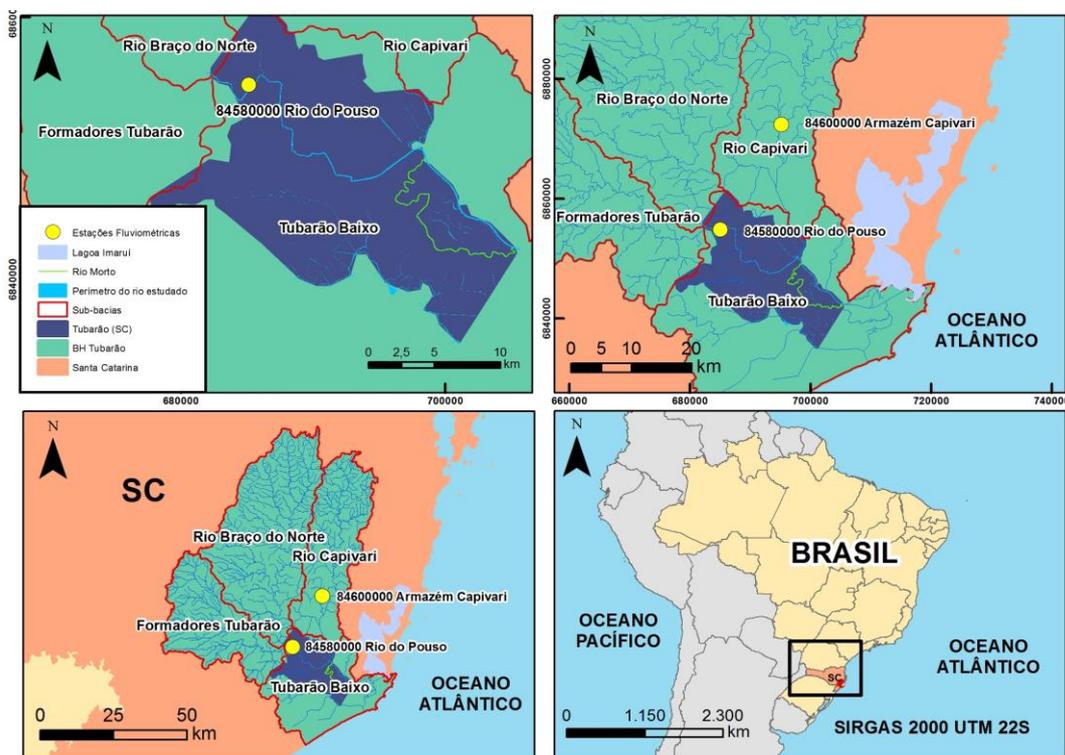


Figura 1 – Localização da área de estudo: Tubarão, SC.

3.1. Dados de vazão, extrapolação da curva-chave e tempo de retorno.

Os dados e resultados dessa seção foram retirados do Projeto “Plano Municipal de Macrodrenagem do Município de Tubarão-SC”, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (GOLDENFUM, J. A. *et al.*, 2017, no prelo). Foram utilizadas duas estações fluviométricas do sistema SNIRH/Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA): estação 84580000 (Rio do Pouso – 68 anos de dados), representando as vazões das sub-bacias do Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão e a estação 84600000 (Armazém Capivari – 63 anos de dados), representando a bacia do Rio Capivari (Figura 1).

As vazões foram determinadas ajustando uma curva-chave a partir das medições de descarga desta estação, com extrapolação pelo método de Stevens para os níveis acima da faixa de medição. Aplicou-se a distribuição de Gumbel na série de vazões calculadas a partir da curva-chave e estimaram-se as vazões para os tempos de retorno de 10, 25 e 100 anos.

Com o uso da distribuição Gumbel, foi possível obter os tempos de retorno para 10, 25 e 100 anos (Tabela 1) sendo a maior contribuição para a simulação referente ao curso principal da estação Rio do Pouso.

Tabela 1. Tempos de retorno das estações fluviométricas estudadas pela distribuição de Gumbel.

Estação	Tempo de Retorno (TR)	Vazão (m ³ /s)	Estação	Tempo de Retorno (TR)	Vazão (m ³ /s)
Rio do Pouso (84580000)	10	1.183,8	Armazém Capivari (84600000)	10	330,9
	25	1.460,3		25	413,9
	100	1.869,0		100	536,5

3.2. Modelagem hidrodinâmica

Na simulação de uma potencial inundação com influência de maré foi utilizado modelo HEC-RAS 5.0.3 (USACE, 2016), já consolidado para simulação de manchas de inundação (MONTE *et al.*, 2016). Essa versão atualizada inclui a simulação bidimensional (2D), a qual foi utilizada no presente trabalho.

Foram utilizados dados do Modelo Digital de Terreno (MDT), fornecido pela Prefeitura Municipal de Tubarão, como entrada de informações altimétricas com gradeamento de 20×20 m e com variação topográfica de metro em metro. O MDT foi manipulado para a adição da batimetria dos rios Tubarão e Capivari. A batimetria do Rio Tubarão foi vetorizada dos dados da empresa PROSUL ([s.d.]) também fornecidos pela Prefeitura. A batimetria do Rio Capivari foi realizada por extrapolação da batimetria do Rio Tubarão na confluência com o próprio Rio Capivari. Para todo perímetro do estudo, adotou-se coeficiente de Manning constante de 0,05 e regime não permanente.

3.2.1. Condições de contorno

Nas condições de contorno de jusante, as situações de cota máxima e mínima de maré amortecida foram incluídas. A série histórica adquirida da Estação 2904 – Laguna – SDS contém dados de 22/08/2014 a 05/07/2016, com intervalo de medição de 15 minutos. A análise desses dados possibilitou identificar que a cota mínima nesse período foi de -0,49 m e a máxima de 0,95 m, ambas ainda não amortecidas pelo complexo lacustre até o início do trecho modelado. Utilizou-se o código IPH-ECO v 0.2 (FRAGOSO Jr. *et al.*, 2007), baseado nas equações de águas rasas, para simular o efeito de amortecimento causado pela Lagoa do Imaruí nas alturas das marés medidas, obtendo-se as marés amortecidas mínima de -0,40 m e máxima de 0,67 m.

3.2.2. Simulação 2D

Foram gerados cenários em função do tempo de retorno (10, 25 ou 100 anos) e das cotas amortecidas mínima e máxima, ou seja, foram realizadas seis simulações. As condições iniciais foram calculadas por meio da opção *Hot-Start* disponível no código utilizado. Por fim, foram simuladas 48 horas com intervalo de tempo de 15 segundos. Nas primeiras 18 horas foram utilizadas vazões com período de retorno de 2 anos para ambas bacias (634,41 m³/s para Formadores do Rio Tubarão e 166,14 m³/s para do Rio Capivari), além de um intervalo de transição de 6 horas para com o tempo de retorno que se tem interesse de se simular, criando-se uma condição inicial mais adequada. Nas 24 horas finais, foram utilizadas as vazões estimadas com os valores de tempo de retorno definidos.

Utilizou-se a equação *Fit* para obter a similaridade das áreas potenciais de inundações com influência de maré alta e baixa (1), sendo que 100% significa similaridade total (BATES e DE ROO, 2000).

$$Fit = \left(\frac{A_{om}}{A_o + A_m - A_{om}} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

onde A_o : Área 1; A_m : Área 2; A_{om} : Área de intersecção entre as áreas A_o e A_m .

3.3. Índice de Perigo

A metodologia, baseada em Stephenson (2002), utiliza a relação velocidade (m/s) \times profundidade da água (m), a fim de propor diferentes níveis de perigo levando-se em conta a intensidade da inundação. Ao levar em consideração o tempo de retorno (TR), empregou-se a relação proposta por Monteiro e Kobiyama (2013) que estabelece 3 limiares de perigo para TR a partir de características locais de precipitação e vazão. Assim, os níveis apresentados no mapa de

perigo resultam da relação entre a intensidade da inundação e o TR. Para este trabalho, definiu-se índice de perigo: alto (10 anos), médio (25 anos) e baixo (100 anos).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados referentes às manchas de inundação e depois desenvolve-se a discussão para os mapas de perigo.

Quanto às áreas de inundação com efeito de maré alta e baixa, os resultados da equação *Fit* são elucidativos (Figura 2 2). As diferenças são de cerca de 60 km² em todos os TRs, sendo que este montante representa mais de 60% da área inundada para os TRs de 10 e 25 anos e aproximadamente 50% da área inundada de 100 anos. Assim, a maré é fator primordial e provoca aumento drástico da área inundada mesmo em um TR alto (100 anos). A similaridade pela equação *Fit* de áreas inundadas não ultrapassa os 50%, um valor baixo (MONTE *et al.*, 2016). Logo, municípios costeiros que possuam rios com influência de maré não devem omitir esses dados em estudos e na construção de planos diretores municipais, de manejo de águas pluviais (drenagem urbana) ou no zoneamento de áreas de ocupação urbana.



Figura 2 – Áreas inundadas para diferentes TRs com e sem influência de maré, intersecção de áreas e métrica de ajuste.

TR 10 Anos: Nas simulações com influência de maré alta, as áreas de perigo médio são muito pequenas e há predomínio do perigo alto. Somente ocorre perigo médio a jusante da área urbana, em uma pequena faixa em ambas as margens, sendo o restante perigo alto. Devido à característica de alta frequência deste TR baixo, observam-se muitas áreas com perigo alto. Como esperado, o efeito de maré alta aumentou a porcentagem de área perigo alto de 91% para 98% da área total inundada nos próprios cenários (Figura 33 e 4).

TR 25 Anos: Na simulação com influência de maré alta, as áreas de perigo baixo são pequenas e o perigo médio predomina. Na influência de maré baixa, há cerca de 8% de área em perigo baixo, uma pequena parte na área urbana e outra a jusante dessa área. O perigo alto encontra-se só na calha no próprio rio e em pequenas planícies a jusante da área urbana. Já a área de perigo médio com maré alta se concentra próximo do círculo urbano, afetando algumas áreas residenciais mais distantes do centro comercial do município (Figura 33 e 4).

TR 100 Anos: Independente da situação de maré baixa ou alta, o perigo alto ocorre em regiões facilmente inundáveis, como plantações de arroz e a jusante do círculo urbano, em pequenas áreas na margem esquerda do canal do Rio Tubarão. Para maré baixa, o perigo baixo está, principalmente, localizado nas regiões a jusante da área urbana, nas proximidades do Rio Morto, e na margem esquerda do Rio Tubarão. Com influência de maré baixa, a área inundada segue a mesma tendência da influência de maré alta, e o perigo alto não atinge diretamente a área do centro comercial, somente regiões vizinhas (Figura 33 e 4).

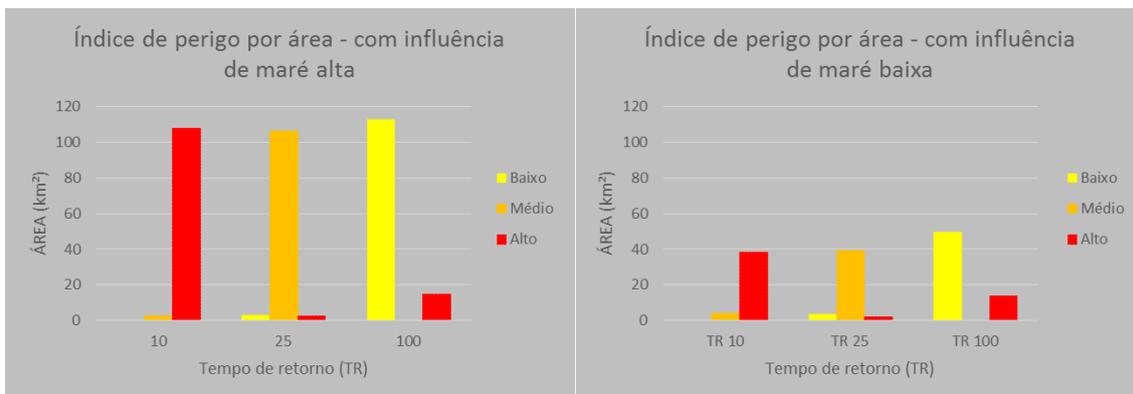


Figura 3 - Área inundada por tempo de retorno e índice de perigo.

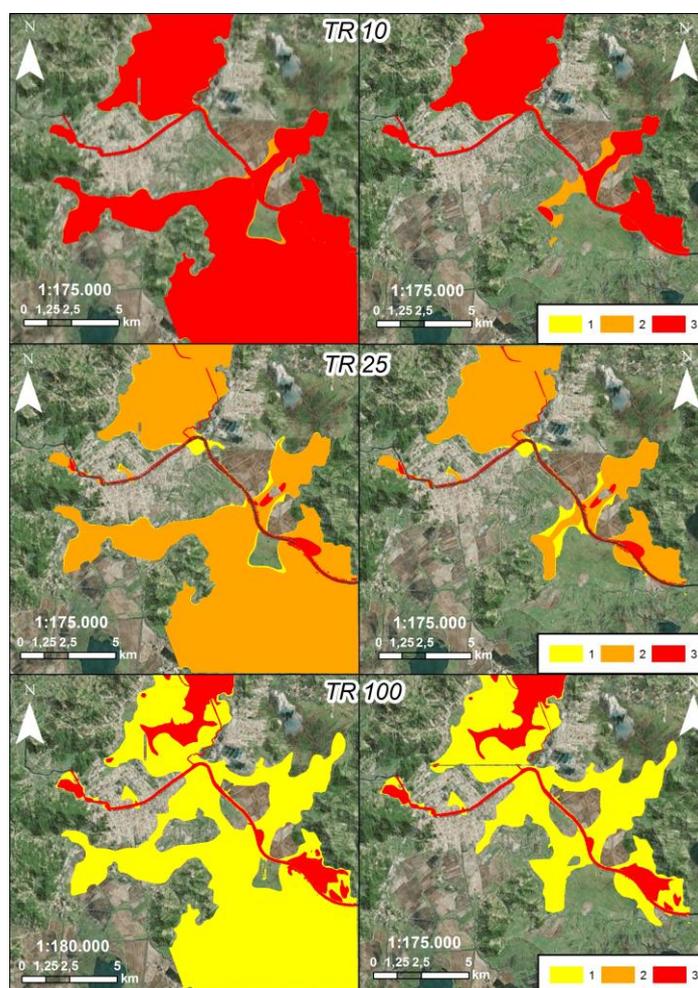


Figura 4 – Inundação estratificada por índice de perigo e por tempo de retorno (1- baixo, 2-médio e 3-alto). À esquerda, considerando efeito de maré alta e à direita, maré baixa.

Os resultados demonstram os percentuais de classificação de perigo (baixo, médio e alto) se alteram significativamente dependendo da condição de maré. Contudo, a maré alta influencia muito na área inundada, o que pode significar um maior número de pessoas afetadas e danos. Para marés altas, observa-se que apenas as áreas de perigo baixo foram acrescidas para TR de 100 anos, o que indica claramente que as velocidades provocadas pela influência da maré são baixas, o que em nenhum aspecto diminui o mérito do estudo de marés, ou condições de remanso em geral para o estudo de perigo de inundação em áreas que sofrem estes efeitos.

O mapa de perigo final é apresentado da Figura 5. Assim, observa-se que, como não foi feito um estudo de frequência relacionado ao efeito de maré mesmo para baixos períodos de retorno, considerou-se a possibilidade de maré alta, o que acarretou que, mesmo em áreas em que há baixa velocidade superficial o perigo é considerado como alto, pois estas áreas estão presentes mesmo para o TR de 10 anos.

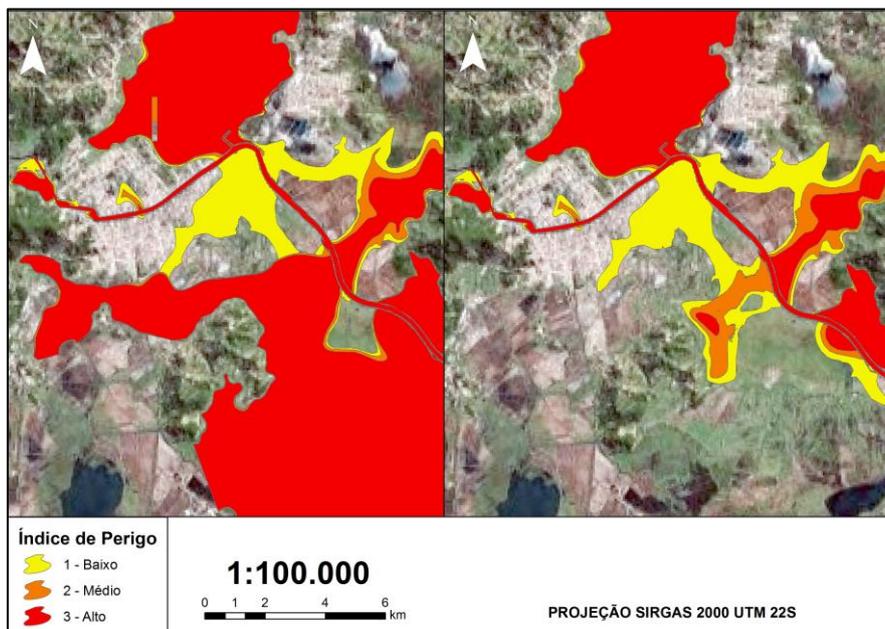


Figura 5 – Mapa de perigo de inundação, à esquerda, com efeito de maré alta e à direita, maré baixa.

CONCLUSÃO

Foram realizadas simulações hidrodinâmicas utilizando o código HEC-RAS 5.0.3 para a criação de mapas de perigo de inundação. Para isso foram calculadas vazões de entrada para o rio Tubarão e Capivari levando em considerações TRs de 10, 25 e 100 anos. Ainda, como condição de saída, foram consideradas condições de efeitos de alta e baixa maré. A definição dos mapas de perigo foi baseada em Monteiro e Kobiyama (2013).

O resultado das simulações para TR 10, 25 e 100 anos com maré alta apresentam áreas afetadas consideráveis a jusante da região urbana do município de Tubarão (áreas próximas ao oceano). As áreas a montante (distantes do oceano) são menos afetadas. A região ao sul e sudeste da área urbana é inundada em todos os TRs na condição de maré alta. Para condições de maré baixa, apenas com TR de 100 anos a região próxima ao Rio Morto e a região urbana são atingidas, demonstrando que esta área está suscetível a inundações provenientes das bacias de contribuição e com ou sem influência da maré. Alguns bairros são propensos a inundações com maré baixa e TR de 10 anos. Outros pontos críticos de inundação referem-se às regiões de meandros do canal, independentemente do TR. Mapas de perigo de inundação são altamente suscetíveis ao efeito de remanso, devendo se ter cuidado especial.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo integra o Projeto “Plano Municipal de Macrodrenagem do Município de Tubarão-SC”, em desenvolvimento pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com suporte financeiro do Município de Tubarão-SC. Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de Doutorado e de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BATES, P.; DE ROO, A. P. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236, (1–2), pp. 54–77. Disponível em [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X). Acesso em 09 ago. 2013.
- CARDONA, O. D.; VAN AALST, M. K.; BIRKMANN, J.; FORDHAM, M.; MCGREGOR, G.; PEREZ, R.; PULWARTY, R. S.; SCHIPPER, E. L. F.; SINH, B.T. (2012). *Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge and New York: [s.n.]. Disponível em https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Chap2_FINAL.pdf. Acesso em 17 mai. 2017.
- FRAGOSO Jr., C. R.; TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W.; MARQUES, D. M. L. M. (2007). Simulação de eutrofização em lagos rasos II: Sistema do Taim (RS). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)* 12 (4), pp. 37–38, 2007. Disponível em: https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/e67b147956babdf670bc6b108d1528ba_161cf8677906c7c22fac91c990a7fc80.pdf. Acesso em 01 jun. 2017.
- GARCIA, E. S.; LOAICIGA, H. A. (2013). Sea-level rise and flooding in coastal riverine flood plains. *Hydrological Sciences Journal* 59 (1), pp. 204–220. Disponível em <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667.2013.798660>. Acesso em 10 mai. 2017.
- GOLDENFUM, J. A. et al. (2017). *Plano Municipal de Macrodrenagem de Tubarão-SC: Zoneamento de inundações - mapeamento das áreas de risco de inundação*. Porto Alegre: [s.n.].
- IBGE. (2010). *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em 02 jun. 2016.
- JACCON, K.; CUDO, K. J. (1989). *Curva-chave: análise e traçado*. Brasília: [s.n.]. 275 p.
- KOSUTH, P.; CALL'EDE, J.; LARAQUE, A.; FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; SEYLER, P.; FRITSCH, J. M.; GUIMARÃES, V. (2009). Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrological Process* 23, pp. 3141 – 3150. Disponível em <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.7387/full>. Acesso em 10 mai 2017.
- KRON, W. (2008). Coasts: The riskiest places on earth. *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*. World Scientific Hamburg, 1, pp. 3 – 21.
- KRON, W. (2012). The riskiest places on earth. pp. 1 – 19. Disponível em https://www.asianscientist.com/wp-content/uploads/2012/07-new/9789814277426_0001.pdf. Acesso em 11 mai 2017.
- MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHAES, L. F. O.; UVO, C. B. (2016). Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone. *Brazilian Journal of Water Resources* 21 (1), pp. 152–167. Disponível em <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5156&ST=>. Acesso em 22 mai 2017.
- MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. (2013). Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. *Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)* 10 (2), pp. 13–35. Disponível em <http://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Monteiro-e-Kobiyama-2013-REGA.pdf>. Acesso: 21 mai 2017.
- PROSUL. *Projeto de manutenção, aprofundamento e recuperação da calha do Rio Tubarão: Levantamento Topohidrográfico*. [S.l: s.n.], [S.d.]
- SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. (2012). Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology* 458–459, pp. 68 – 86.
- SCHOLZ, M.; YANG, Q. (2010). Guidance on variables characterising water bodies including sustainable flood retention basins. *Landscape and urban planning* 98 (3), pp. 190 – 199.
- STEPHENSON, D. (2002). Integrated flood plain management strategy for the Vaal. *Urban Water* 4 (4), pp. 423–428. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462075802000328>. Acesso em 9 mai 2016.
- USACE. (2016). *HEC-RAS River Analysis System – 2D Modeling User's Manual*. Davis: [s.n.]. Disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS5.0UsersManual.pdf>.