

CONDIÇÃO DE INICIALIZAÇÃO EM MODELAGEM HIDRODINÂMICA PARA MAPEAMENTO DE INUNDAÇÃO BASEADA EM VAZÕES CONSTANTES

Franciele Maria Vanelli^{1}; Leonardo Romero Monteiro¹; Franciele Zanandrea¹; Gustavo Kretschmann Ruas Lima²; Edith Beatriz Camano Schettini³; Joel Avruch Goldenfum³*

Resumo – As perdas humanas e econômicas decorrentes de inundações impulsionam a necessidade por instrumentos de planejamento para prevenção e minimização dos riscos associados. A limitação de dados disponíveis ou do tempo para execução pode dificultar, ou até mesmo inviabilizar, a aplicação de modelagem hidrodinâmica para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação. Com base nessas considerações, como elaborar um produto final de forma simplificada e eficiente mediante a ausência de modelos hidrológicos? O presente artigo propõe a inserção de uma condição de inicialização para simplificação das condições de contorno da modelagem hidrodinâmica baseando-se em vazões constantes. O objeto de estudo contempla parte do município de Tubarão, SC. As condições de contorno referem-se à estimativa das vazões máximas, com distribuição de Gumbel, para os períodos de retorno de 2 e 25 anos, e a altura mínima da maré amortecida devido à proximidade do Município com a costa. A inserção da condição de inicialização com variação gradual de vazão é uma forma simplificada para obtenção de mapas de inundação e não substitui a condição inicial e o procedimento de aquecimento (*warm-up*) inerentes ao modelo hidrodinâmico.

Palavras-Chave – Mapeamento de inundação. Condição de contorno. escoamento não permanente.

INITIALIZATION CONDITION FOR FLOOD MAPPING WITH HYDRODYNAMICS MODELLING BASED ON CONSTANTS DISCHARGES

Abstract – Human and economic losses resulting from floods promote the need for elaboration of planning instruments to prevent and minimize associated risks. The limitation of available data or time may make it difficult or unfeasible to apply a hydrodynamic modeling to estimate flooded areas. Based on these considerations, how can we prepare a final product in a simplified and efficient way through a lack of hydrological models? The present paper proposes the use of an initialization condition to simplify the boundary conditions of hydrodynamic modeling based on constants discharges. The object of study considers a parcel of area in Tubarão city, SC. The boundary conditions refers to the maximum discharges for the return periods of 2 and 25 years estimated by Gumbel Distribution and a minimum height of the tide. The insertion of the initialization condition with gradual variation is a simplified form to obtain flood maps. It does not replace initial conditions and the warming-up of the hydrodynamic model.

Keywords – Flood mapping. Boundary conditions. Unsteady flow.

¹ Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - IPH/UFRGS

² Graduação em Engenharia Ambiental – UFRGS. IPH/UFRGS

³ Professor Titular – IPH/UFRGS

E-mails: *franvanelli@yahoo.com.br; leonardoromeromonteiro@gmail.com; franciele.zanan@gmail.com; gus_lima_@hotmail.com; bcamano@iph.ufrgs.br; joel@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

As inundações, como desastres naturais, ocorrem todos os anos em todo mundo, apresentando uma ameaça constante à vida e à propriedade. Conforme Samela *et al.* (2017), uma importante maneira de prevenir e reduzir os danos causados por inundações é por meio do fornecimento de informação à população sobre o risco associado em determinado local através de mapas de inundação. Habitualmente no Brasil, a identificação de áreas vulneráveis a inundações é feita de maneira simplificada. Os métodos simplificados comumente utilizados se baseiam em informações sobre a extensão da inundação histórica ou simplesmente definindo uma zona de proteção em torno dos rios de acordo com as cotas do terreno (Risi, Jalayer e Paola, 2015). Recentemente, metodologias mais complexas foram desenvolvidas para delimitar as áreas propensas a inundações e determinar o zoneamento de inundação. A metodologia mais utilizada se baseia em modelos hidrodinâmicos que fornecem dados de velocidade e profundidade, além da extensão espacial afetada pela inundação.

Todo modelo é uma tentativa de representação da realidade, exigindo que se assumam algumas hipóteses simplificadoras para modelar fenômenos físicos. Muitos estudos de inundação se baseiam em formulações de escoamentos permanentes, ou ainda, desconsideram o tempo de duração da vazão máxima. Especial atenção deve ser dada a este fato, pois independente do equacionamento a ser utilizado, o tempo de duração do fenômeno de inundação pode ser menor que o tempo de preenchimento da área de estudo. Desse modo, a mancha de inundação pode não representar a área máxima atingida.

Devido às dificuldades encontradas na obtenção de dados no Brasil para calibração de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, associada à baixa disponibilidade de tempo quando se trata de projetos de engenharia, surge a necessidade da obtenção de metodologias simplificadas e eficientes para obtenção de mapas de inundação. Com isso, este estudo tem como objetivo analisar a inserção de condições de inicialização em modelagem hidrodinâmica para mapeamento de inundação considerando a ausência do modelo hidrológico.

TEMPO DE PREENCHIMENTO E DURAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS

Cada área de estudo possui seu próprio tempo de preenchimento. Entende-se como tempo de preenchimento, o tempo que uma área de estudo leva para que um dado escoamento, correspondente a certo período de retorno (TR), com vazão constante, alcance o estado permanente, levando em consideração que a mancha de inundação permaneça estável. Desse modo, a área de inundação em um tempo “n” deve ser igual a uma área de inundação em um tempo “n+1”.

Quando se utiliza um equacionamento permanente em certa área de estudo, o tempo de duração do fenômeno a vazão constante é maior do que o tempo de preenchimento desta área. Ao se utilizar um equacionamento não permanente, quando não se pode definir adequadamente o tempo de duração de um fenômeno, utiliza-se um tempo arbitrário, que poderá ter alguma relação com o tempo de concentração das bacias de contribuição. Caso essa estimativa de tempo for superior ao tempo de preenchimento da área de estudo, o estado permanente será alcançado. Entretanto, em virtude da duração do evento superestimada ocorre um acréscimo de área na mancha de inundação.

Ainda, deve-se ter cuidado especial ao utilizar vazões provenientes de estudos de períodos de retorno. Para o Brasil, diversas considerações de períodos de retorno para vazões levam em conta vazões máximas diárias em um ano. A partir de medições diárias, observa-se a máxima que ocorreu em um ano e esta será utilizada para o cálculo de uma vazão definida para um período de retorno. Muitas vezes, utilizam-se distribuições estatísticas para tal, como a distribuição de Gumbel. Assim, a vazão fornecida por estes métodos deve ser considerada como, no máximo, uma vazão de duração de 24 horas, pois as estatísticas provieram de dados diários. Cabe lembrar que grandezas diárias e grandezas de 24 horas podem diferir, porém neste estudo será considerado que ambas são iguais.

Caso tenha uma certa vazão, proveniente de um certo período de retorno (TR), esta vazão deve ser considerada como condição de entrada por apenas um dia, caso a duração do evento tenha sido desconsiderada no cálculo desta vazão. Ainda assim, ressalta-se a necessidade de cuidado com a definição das condições de inicialização e de encerramento deste evento, que devem corresponder a uma situação de ocorrência provável. Desse modo, o tempo de ascensão e recessão de um hidrograma proveniente de uma distribuição de vazões máximas para um evento de um dia de duração usual deve ocorrer gradualmente, com transições suavizadas representativas da realidade ao invés de entradas abruptas não compatíveis com o fenômeno em escala real (Figura 1). Caso o tempo de preenchimento da área seja menor do que um dia, tais precauções não são necessárias.

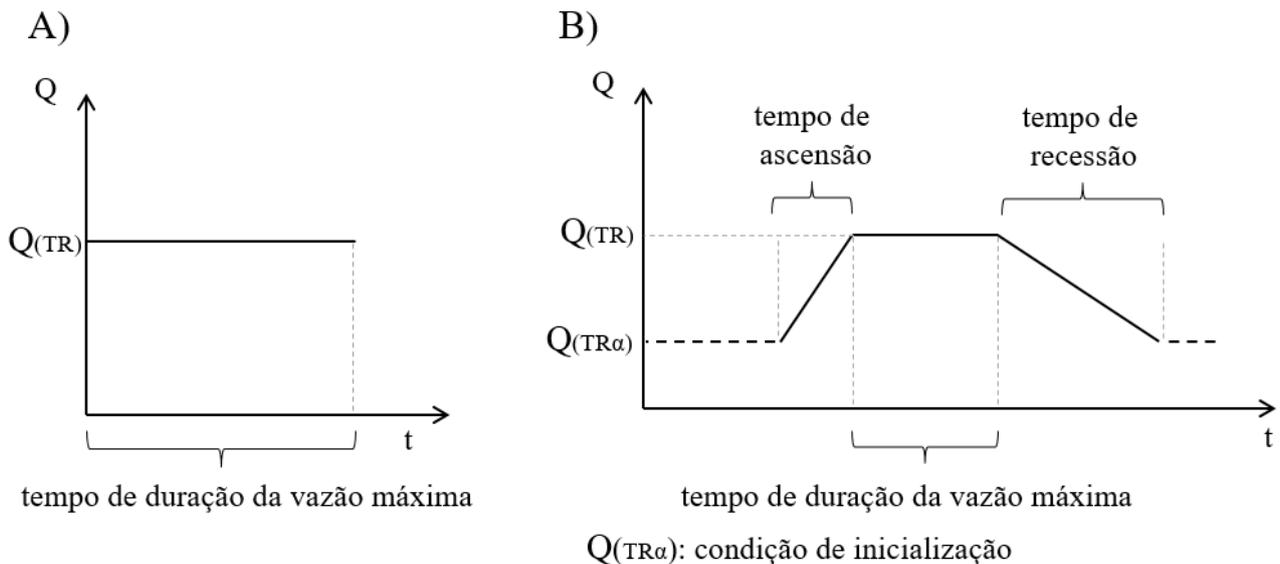


Figura 1 – Ascensão e recessão do hidrograma de forma a) abrupta, b) gradual.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Tubarão está localizado na região sul do estado de Santa Catarina, possui população aproximada de 100 mil habitantes e está totalmente inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão cuja área total corresponde a 4.740 km². A bacia hidrográfica do Rio Tubarão compreende as sub-bacias do Rio Capivari, do Rio Braço do Norte, dos formadores do Rio Tubarão e do Baixo Tubarão. O Município é cortado pelo Rio Tubarão que possui um conhecido histórico de inundações, destacando-se o evento de 1974 que gerou graves perdas, sendo posteriormente promovida a retificação e dragagem do rio (SDM, 2002). A critério de estudo, a área inundável limitou-se à área densamente urbanizada e à pequena parte da área rural (Figura 2).

METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste na realização de simulações hidrodinâmicas objetivando: (i) a determinação do tempo de preenchimento na área de estudo; (ii) a simulação da ocorrência do evento de interesse de forma abrupta; (iii) a simulação da variação gradual considerando as condições de inicialização; (iv) a comparação entre a ocorrência abrupta e a gradual; e, (v) fazer uma discussão sobre a relevância da definição de condições de inicialização em modelagem hidrodinâmica para mapeamento de inundações baseada em vazões constantes.

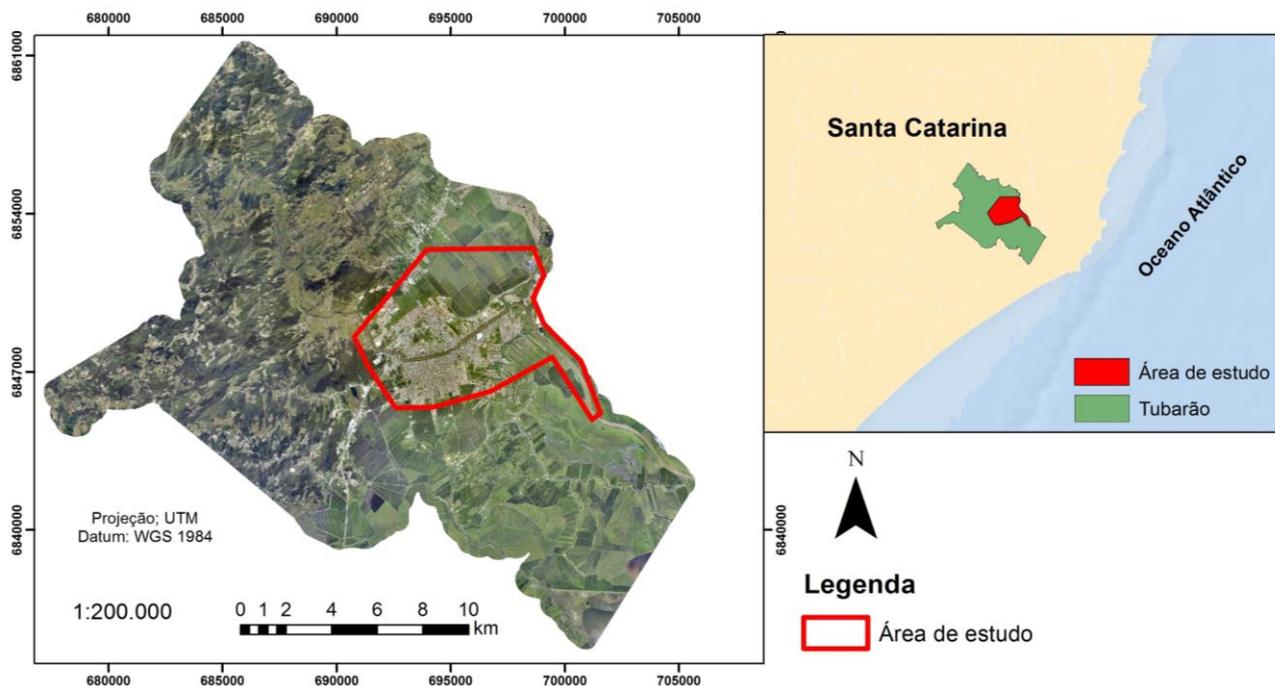


Figura 2 – Delimitação da área de estudo.

As simulações foram realizadas com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0.3 (USACE-HEC, 2016), utilizando discretização bidimensional e o módulo de equações de águas rasas. Para toda a área de estudo, considerou-se coeficiente de Manning constante e igual a 0,06. As simulações foram realizadas com intervalo temporal de 15 segundos. As condições iniciais foram calculadas por meio da opção *Hot-Start* disponibilizada neste código.

Para entrada de informações altimétricas, utilizou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT), fornecido pela Prefeitura Municipal de Tubarão, com gradeamento de $20 \times 20 \text{ m}$ e variação topográfica de metro em metro. O MDT foi manipulado para adicionar a batimetria do Rio Tubarão e do Rio Capivari. A batimetria do Rio Tubarão foi adquirida pela vetorização dos dados da empresa PROSUL ([s.d.]), também fornecidos pela Prefeitura. Já a batimetria do Rio Capivari foi obtida da extrapolação da batimetria do Rio Tubarão na confluência com o próprio Rio Capivari. Com base no MDT, foi realizada a delimitação da área de estudo de acordo com a Figura 2 e atribuídos os valores das condições de contorno a montante e a jusante.

Para definição da condição de contorno a montante, foram utilizadas vazões provenientes da distribuição de Gumbel para estimativa das vazões máximas dos TRs de interesse. Os dados de vazão fornecidos para definir os parâmetros da distribuição foram obtidos de uma curva-chave criada a partir das medições de descarga líquida, efetuando extrapolação pelo método de Stevens (Jacon e Cudo, 1989). A determinação das estações fluviométricas, que fornecem os dados de descarga líquida e de nível, foi realizada a partir do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017). Estas foram selecionadas adotando como critério a proximidade com o município de Tubarão e a disponibilidade temporal da série histórica com grande período de monitoramento e poucas falhas de dados de vazão. Para as bacias do Rio Braço do Norte e Formadores do Rio Tubarão, foi escolhida a estação fluviométrica 84580000, denominada Rio do Pouso, localizada nas coordenadas X 685122 e Y 6854817 (UTM), que apresenta 68 anos de dados. Para a bacia de contribuição do Rio Capivari, foi necessário aplicar o método de regionalização de vazões para a estação fluviométrica selecionada, denominada Armazém Capivari (84600000), com 63 anos de dados, coordenadas X 695211 e Y 6872390 (UTM).

Adotou-se um tempo de retorno $TR = 2$ anos por se tratar da mediana das cheias anuais (Christofoletti, 1981) e um $TR = 25$ anos, correspondente ao TR mínimo aceito para financiamentos federais de obras de drenagem. Os valores referentes à condição de contorno a montante são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Vazões máximas estimadas para os períodos de retorno de 2 e 25 anos.

Código	Nome do posto	Vazão estimada $TR = 2$ anos	Vazão estimada $TR = 25$ anos
84580000	Rio do Pouso	$634,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$1.460,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
84600000	Armazém Capivari	$166,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$413,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Como condição de contorno de jusante foi considerada a altura mínima amortecida da maré. Para definir esse valor, foi identificada a cota mínima de $-0,49 \text{ m}$, obtida a partir da série histórica adquirida da Estação 2904 – Laguna – SDS, com observações no período de 22/08/2014 a 05/07/2016 e intervalo de medição de 15 minutos. Utilizando o código IPH-ECO v 0.2 (FRAGOSO Jr. *et al.*, 2007), baseado nas equações de águas rasas, foi simulado o efeito de amortecimento causado pela Lagoa do Imaruí nas alturas das marés medidas, obtendo a altura da maré mínima amortecida de $-0,40 \text{ m}$. Essa condição de contorno de jusante foi mantida em todas as simulações.

Para simulação a ocorrência abrupta do evento extremo, foram consideradas apenas as contribuições estimadas para $TR = 25$ anos (Tabela 1). A partir do tempo simulado de 10 dias, foram delimitadas as áreas atingidas ao longo do tempo para 1, 2 e 3 dias e a área máxima afetada. Para determinação do tempo de preenchimento da área de estudo aplicaram-se as vazões estimadas para $TR = 2$ anos de ambas as estações fluviométricas (Tabela 1), considerando 10 dias de simulação do evento, objetivando estabilizar a mancha de inundação.

Os dados obtidos possibilitaram a simulação da transição entre o evento antecedente e o evento extremo através da variação gradual da vazão de entrada (Figura 1). Para a condição de contorno a montante considerou a situação estabilizada da vazão com $TR = 2$ anos, seguido pelo tempo de ascensão correspondente à faixa de transição entre $TR = 2$ e $TR = 25$ anos. Posteriormente, manteve-se a vazão estimada para $TR = 25$ anos constante por determinado intervalo de tempo até iniciar o tempo de recessão, atingindo a vazão estimada de $TR = 2$ anos e essa mantida constante por 2 dias. O tempo de ocorrência do evento referente ao $TR = 25$ anos foi de 24, 48 e 72 horas de simulação.

O tempo de concentração das bacias de contribuição foi adotado igual ao tempo de ascensão do hidrograma, calculado com a equação de Ven te Chow adaptado de MOPU (1987), dada por:

$$T_c = 0,16 L^{0,64} S^{-0,32}, \quad (1)$$

onde T_c é o tempo de concentração (h), L é o comprimento do canal (km) e S é a declividade do fundo do canal. Essa equação se aplica para bacias rurais com área entre 6 e 11.162 km^2 , apresentando erro médio de -7% e erro padrão de 19% , tendo resultados satisfatórios em comparação com outras equações (Silveira, 2005). Para o presente caso foi obtido $T_c = 9 \text{ h}$.

O tempo de recessão considerado foi de 24 h, estimado através dos dados de precipitação e vazão disponibilizados no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017). Avaliou-se o período das cheias no Município, entre março e abril, e foi identificado que, após a ocorrência da precipitação, são necessárias cerca de 24 horas para que a vazão nos corpos hídricos fique constante.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas utilizando o procedimento de aquecimento (*warm-up*) do HEC-RAS e com a inserção das condições iniciais, pois não é possível realizar uma simulação hidrodinâmica para escoamentos não permanentes sem esses dados. As condições de inicialização

propostas são mais complexas do que a adição de uma condição inicial simples ou do que um procedimento de aquecimento usual. A condição de inicialização, aqui proposta, pode ser entendida como um procedimento de aquecimento variável a ser aplicado na ausência do modelo hidrológico.

Os mapas de maior abrangência da mancha de inundação foram obtidos considerando a área total atingida durante todo o tempo de simulação. Foram necessários 4 dias de evento simulado para estabilização da mancha de inundação utilizando o TR = 2 anos (Figura 3A). Já para TR = 25 anos (Figura 3B), foram necessários 5 dias e 16 horas. Apesar do aumento da vazão, de 2,3 vezes do TR = 2 anos para TR = 25 anos, o tempo de preenchimento variou cerca de 2 dias apenas, apresentando um comportamento não linear, no que se refere a dias para a estabilização da mancha de inundação na área de estudo e a vazões fornecidas ao sistema.

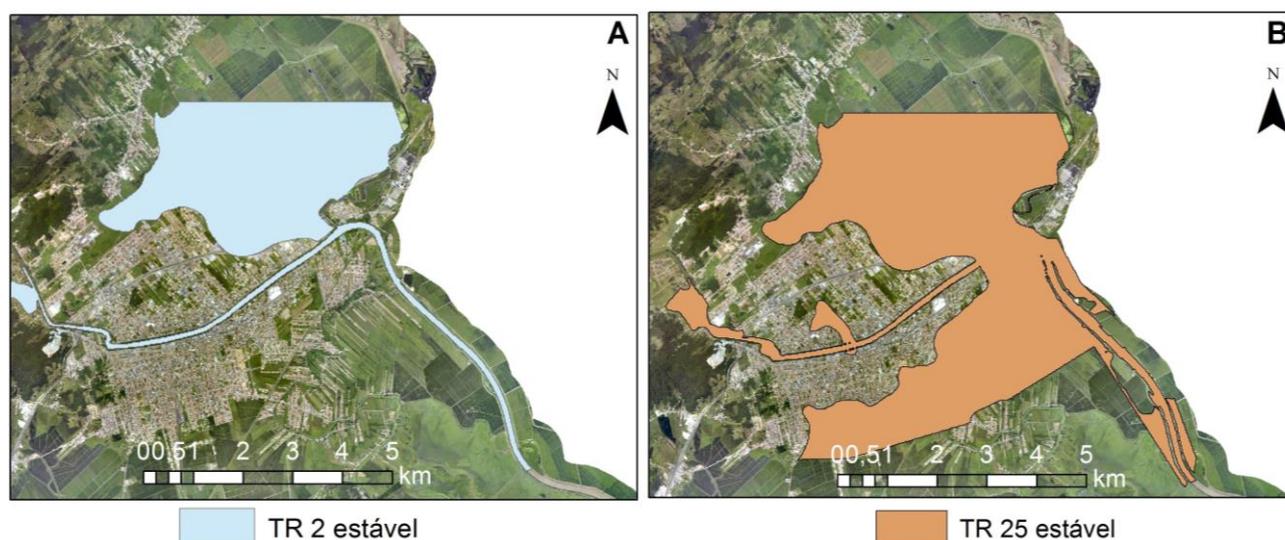


Figura 3 – Manchas de inundação estabilizadas para o período de retorno de A) 2 anos e B) 25 anos.

Ao comparar os cenários de ocorrência abrupta e variação gradual (Figura 4), observa-se um aumento considerável de $4,3 \text{ km}^2$ nas áreas inundadas dos casos de duração de 1 dia (Figura 4A e Tabela 2). A área inundada a montante, tanto do Rio Tubarão quanto do Rio Capivari, é semelhante perante ambos os cenários. Já a jusante, verifica-se grande variação da área inundável. Fato similar é observado para as durações de 2 e 3 dias, porém com a redução da diferença entre as áreas inundadas, sendo de $0,4 \text{ km}^2$ para 2 dias e $0,2 \text{ km}^2$ para 3 dias (Figura 4B e 4C, respectivamente e Tabela 2). Assim, entende-se que o tempo de preenchimento desta área de estudo é maior do que 3 dias. Mesmo para o cenário de variação gradual, 3 dias de duração para a vazão com TR = 25 anos não são suficientes para estabilizar a simulação (Figura 3B).

Tabela 2 – Áreas inundadas em decorrência da entrada abrupta e variação gradual.

Cenário	Área inundada		Cenário	Área inundada	
	km ²	%		km ²	%
Entrada Abrupta	1 d	20,6	Variação Gradual	1 d	24,9
	2 d	25,4		2 d	25,8
	3 d	26,2		3 d	26,4
TR 2 estável	14,0	51,5	TR 25 estável	27,5	100,0

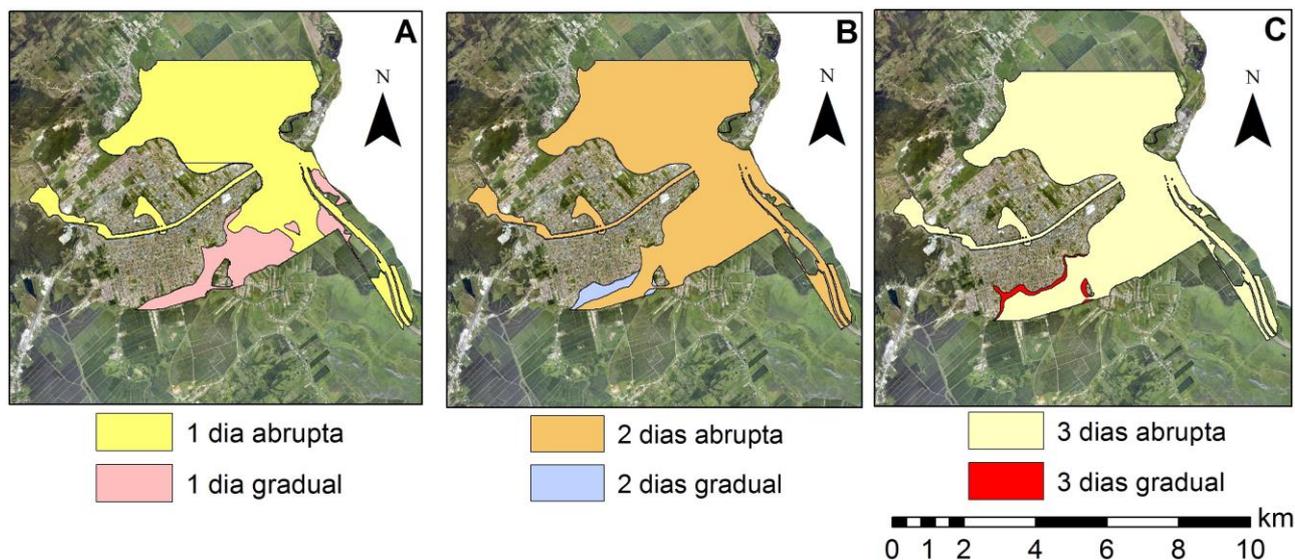


Figura 4 – Manchas de inundação para os casos abrupto e gradual, com A) 1 dia, B) 2 dias e C) 3 dias.

Para todos os eventos, o mapa com maior extensão inundada foi obtido ao se considerar o incremento de área gerado na recessão e estabilização da menor vazão do hidrograma. Isto significa que o escoamento do volume de uma área de montante para jusante contribui para o aumento da área inundada, mesmo após a passagem da vazão máxima. Tal fato demonstra a importância do tempo de recessão do hidrograma no mapeamento de inundações.

Ao considerar a entrada da cheia de maneira simplificada, de forma abrupta, as manchas de inundação são subestimadas, como se pode observar na Figura 4, quando comparadas com as manchas obtidas de maneira gradual. Isso ocorre porque não são considerados os tempos de ascensão e recessão do hidrograma da cheia.

O estudo contemplou majoritariamente a área densamente urbanizada e parte de uma área rural ao norte do município de Tubarão, SC. Esta delimitação reduz o armazenamento natural existente nas áreas de rizicultura, representando um decréscimo no tempo de preenchimento total do Município, de modo a constatar que o tamanho da área de estudo e o tempo de preenchimento guardam certa proporcionalidade.

CONCLUSÕES

A inserção de condições de inicialização, proposta no presente artigo, não substitui as condições iniciais e o procedimento de aquecimento na simulação hidrodinâmica. Trata-se de uma alternativa para elaboração de mapas de inundação fiáveis baseados em vazão constante considerando que o tempo de preenchimento da área de estudo é superior a um dia.

Destaca-se a importância de levar em consideração o tempo de recessão do hidrograma de cheia no mapeamento de inundações, pois como observado nos resultados, algumas áreas são afetadas somente após a passagem da cheia em decorrência do escoamento dos volumes de montante a jusante. Este fato é ainda mais relevante quando se trata de áreas planas.

Ao elaborar mapeamento de inundação baseado em vazões constantes para simplificação das condições de contorno da modelagem hidrodinâmica, deve-se atentar ao tempo de preenchimento da área de estudo para definição da condição de inicialização, bem como definir os tempos de ascensão e recessão do hidrograma da cheia.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo integra o 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), com suporte financeiro do Município de Tubarão, SC. Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de Mestrado/Doutorado e de Produtividade em Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2017). *Hidroweb*: estações fluviométricas.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981). *Geomorfologia fluvial*. 1. Editora Edgard Blücher: São Paulo.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989). *Curva-chave*: análise e traçado. Brasília: DNAEE. 273 p.
- FRAGOSO Jr., C. R. F. *et al.* (2007). Simulação de Eutrofização em Lagos Rasos II: Sistema do Taim (RS). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12 (4), pp. 37–38.
- RISI, R. de; JALAYER, F.; PAOLA, F. de. (2015). Meso-scale hazard zoning of potentially flood prone areas. *Journal of Hydrology*, 527, pp. 316 - 325
- MOPU Tecnologia Carreteras. (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Textos de la Dirección General de Carreteras, 12, Espanha, 124 p.
- SAMELA, C.; MANFREDA, S.; TROY, T. J. (2017). Dataset of 100-year flood susceptibility maps for the continental U.S. derived with a geomorphic method. *Data in Brief*, 12, pp. 203 - 207.
- SDM (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente). (2002). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar*. Florianópolis, SC, 1.
- SILVEIRA, A. L. L. da. (2005). Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 10 (1), pp. 5 - 23.
- PROSUL. *Projeto de manutenção, aprofundamento e recuperação da calha do Rio Tubarão: Levantamento Topohidrográfico*. [S.l: s.n.], [S.d.].
- USACE-HEC. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0*. Brummer, G. W.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2016.