

XI-1348 - UTILIZAÇÃO DO SWMM PARA AVALIAR A MAGNITUDE DE INUNDAÇÕES DURANTE EVENTOS INTENSOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM CIDADE AMAZONICA: A SITUAÇÃO DA BACIA DA TAMANDARÉ DO MUNICÍPIO DE BELÉM/PA

João Diego Alvarez Nylander⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFPA). Engenheiro da COSANPA. Doutorando em Engenharia Civil no PPGEC/UFPA.

Elizabeth Sousa de Araújo⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre. Engenheira da COSANPA.

Yasmin Coelho Ribeiro da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Pará. Engenheira da COSANPA.

Marcus Vinicius Sousa Gonçalves⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e de Energias Renováveis

Endereço⁽¹⁾: Pass. Santo Antônio, s/n - Benguí - Belém - PA - CEP: 66643-190 - Brasil - Tel: (91) 32789449 - e-mail: joao.diego@cosanpa.pa.gov.br

RESUMO

Avaliar a ocorrência de inundações durante eventos extremos de precipitação pluviométrica, de maré alta e a partir da interrelação desses eventos em bacia hidrográfica urbana a partir do SWMM. A pesquisa foi desenvolvida na bacia da Tamandaré, localizada na zona central do município de Belém (PA). Para isso, foram definidas três etapas. Inicialmente foram levantadas informações de dados topográficos, de uso e ocupação do solo, do sistema de macrodrenagem e das variáveis hidrológicas. Em seguida, foram criados 9 Cenários de escoamento na bacia e simulados no software Storm Water Management Model 5.0, sendo: 4 cenários de precipitação pluviométrica, para eventos de diferentes durações 1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h; 1 cenário apenas com maré alta; e 4 cenários com precipitação pluviométrica ocorrendo em momento de maré alta. No estudo foi constatada a grande ocupação urbana na bacia, que ocorreu sem considerar áreas permeáveis no encaminhamento das águas pluviais até o canal de drenagem. Os resultados da modelagem hidrodinâmica demonstraram que o canal tem capacidade para escoar volumes precipitados com tempo de recorrência de 25 anos, mesmo com condições estruturais precárias. Contudo, na simulação do regime fluvial, foi verificada ocorrência de inundação, que atingiu 0,91% da área da bacia. Na coincidência dos dois eventos hidrológicos, a magnitude da mancha de inundação foi ampliada até 29,13 vezes, podendo afetar 28,19% da área da bacia. Com a pesquisa, foi constatado que a utilização de comporta é indispensável em canais que sofrem influência do regime fluvial, devendo ser complementada com de estruturas de amortecimento ou bombeamento para o adequado manejo das águas pluviais em bacia urbanizada com cotas mais baixas.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia Hidrográfica da Tamandaré, Canal de Drenagem, Maré Alta, Precipitação Pluviométrica, Inundação.

INTRODUÇÃO

A formação de diversos centros urbanos brasileiros ocorreu às margens de corpos d'água, sendo consolidada sem planejamento e com infraestruturas insuficientes para o manejo adequado das águas pluviais (Galvão, 2014). A consequência desse processo de urbanização é a modificação das condições naturais de escoamento das bacias hidrográficas, que passaram a ter a cobertura vegetal retirada, reprimindo o fenômeno de evapotranspiração, e a capacidade de infiltração no solo reduzida, devido à pavimentação asfáltica, construção de imóveis e outras formas de ocupação do solo, gerando grandes camadas impermeáveis, que elevaram significativamente o volume pluvial escoado superficialmente (TUCCI, 2008).

Santos et al. (2017) e Dubbelboer et al. (2017) comentam que a impermeabilização e a implantação de galerias sem planejamento aumentam a velocidade de escoamento das precipitações pluviométricas em áreas urbanas, facilitando a sobrecarga dos sistemas de drenagem e, por consequência, o acúmulo indevido de águas pluviais em pontos mais baixos da bacia. O impacto desse incremento pluvial nos fundos de vale é o aumento da vazão

para rios urbanos e/ou canais, que, quando não possuem capacidade de escoamento, elevam a lâmina líquida até o extravasamento, gerando eventos de inundação.

Para o zoneamento de regiões passíveis de inundação são utilizados registros históricos de áreas afetadas, entretanto, com o avanço de ferramentas computacionais, é possível realizar a previsão das áreas de risco tanto para eventos reais, quanto simular eventos extremos, facilitando o mapeamento antecipado de seus efeitos negativos, a fim de garantir melhor proteção da área urbana (MIGUEZ et al., 2015; FEITOSA et al., 2020).

No estudo de Formiga et al. (2016), foi verificado que o modelo SWMM apresenta boa representatividade para simular eventos pluviométricos de grande intensidade em bacia pequenas, mesmo sem informações de vazão para calibração. Cabral et al. (2009) ainda comenta que é possível avaliar a eficácia dos sistemas de drenagem urbana com o SWMM, permitindo análise do efeito de medidas compensatórias, de proteção da qualidade das águas e mapeamento de áreas inundáveis.

Nesse contexto, o objetivo da pesquisa é a avaliação da potencialidade e da magnitude de inundação na bacia hidrográfica urbana da Tamandaré, município de Belém (PA), durante eventos extremos de precipitação pluviométrica e maré alta e com a sua interrelação.

METODOLOGIA

• ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido na bacia da Tamandaré, que apresenta área de contribuição de 1,75 km² (perímetro de 5,65 km), com amplitude altimétrica de 11,38 m e declividade média de 1,37%, definida como bacia plana (Nylander, 2019). A ocupação da bacia é composta por zonas de características habitacionais e comerciais, com 31,53 km de vias e 5.255 domicílios, segundo dados do IBGE (2010). A bacia está localizada na porção sudoeste (Área Central) do município de Belém/PA, formada por parte de quatro bairros (Batista Campos, Cidade Velha, Campina e Jurunas). Na Figura 1 é apresentado a localização da bacia da Tamandaré

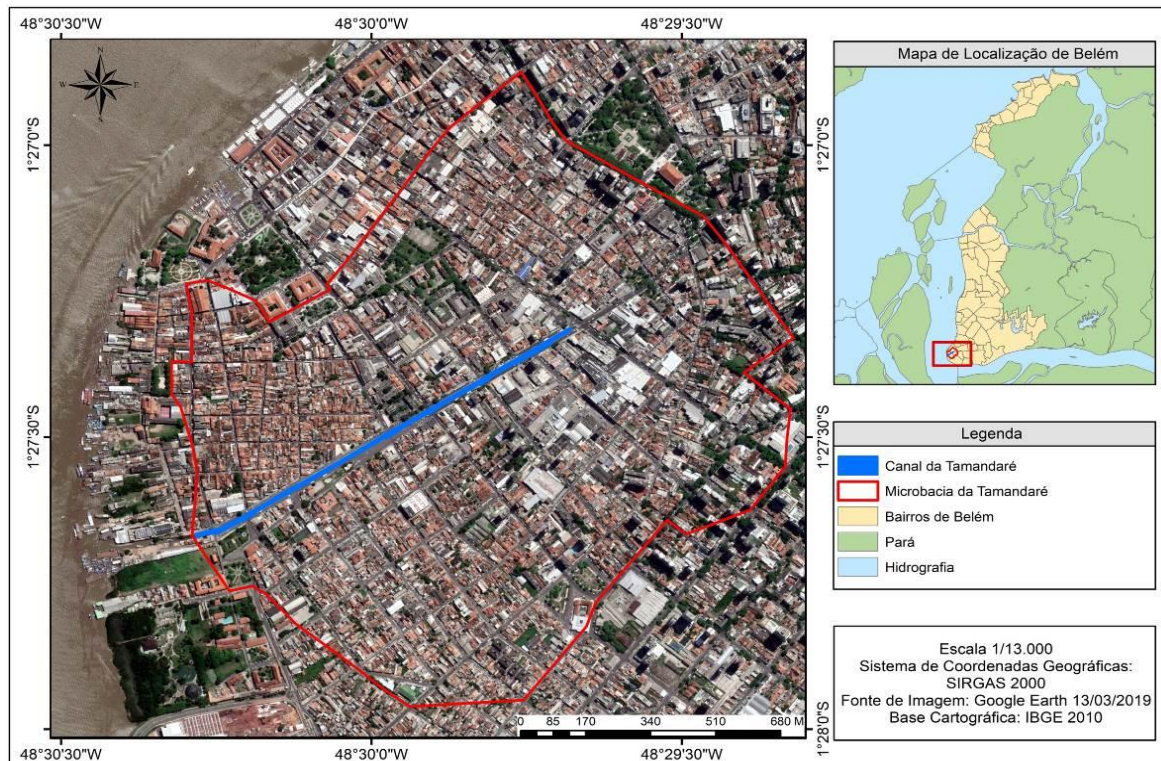


Figura 1: Delimitação da Bacia da Tamandaré no município de Belém/PA.

Borges (2012) destaca que a urbanização dessa bacia foi intensificada ainda no século XIX com o aterramento de áreas ribeirinhas, principalmente, dos bairros da Cidade Velha e da Campina. Esse processo de modificação da estrutura urbanística da bacia da Tamandaré fez com que áreas com cotas abaixo de 4 m fossem ocupadas,

consolidando a malha urbana sem considerar eventos de elevação de nível de maré menos recorrentes, as quais atingem a Avenida Almirante Tamandaré (via trafegável que margeia o canal de drenagem).

• Etapas da Pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas: a) caracterização das condições relacionadas ao escoamento das águas pluviais na bacia da Tamandaré; b) avaliação dos efeitos independentes de escoamento de precipitação pluviométrica e de maré; e c) determinação dos efeitos de inundação na coincidência dos dois eventos hidrológicos.

Na primeira etapa foram levantados os dados de entrada necessários para o desenvolvimento da modelagem hidrodinâmica no SWMM 5.0. Inicialmente, foi realizado o seccionamento da área de contribuição da Tamandaré em sub-bacias. Para isso, foi verificado in loco as principais galerias de drenagem que chegam ao canal e realizado estudo planialtimétrico das curvas de nível com equidistância de 0,5 m pelo software Autocad, baseado na referência de nível (RN) da Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém, definindo a área de contribuição para o escoamento pluvial de cada galeria. Esse detalhamento foi importante para reduzir os picos pontuais de vazão inseridos nos modelos, que podem causar sobrecarga sem representatividade real.

A delimitação das sub-bacias permitiu melhor detalhamento das características físicas de cada sub-região da bacia da Tamandaré. O software Autocad também foi utilizado na determinação da largura equivalente, medida em metros, definido como o encaminhamento do ponto mais distante da sub-bacia à chegada da galeria correspondente ao canal. Enquanto, para a determinação da declividade foi utilizada a Equação 1.

$$I = (Eq/A) * \sum ECN \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: I é a declividade (m/m); Eq é a equidistância das curvas de nível (m); A é a área da sub-bacia (m²); ECN é a extensão da curva de nível (m).

Seguindo as recomendações de Rossman (2015) para determinar os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n), foram considerados diferentes tipos de superfície sobre a bacia: asfalto (n: 0,012), calçada (n: 0,013), telhado (n: 0,012) e gramado (n: 0,15). Para isso, foi utilizada imagem de satélite do Google Earth. Nesse sentido, foram delimitadas as superfícies para determinar a parcela permeável e impermeável e seus respectivos coeficientes de rugosidade de Manning. Enquanto, o armazenamento em depressões utilizado para superfície impermeável e permeável foi de 2,54 mm e 5,8 mm, respectivamente.

O mesmo detalhamento por tipo de superfície foi utilizado para definir os valores de curve number (CN) empregado no método de infiltração Soil Conservation Service (SCS), sendo definido o valor de CN de 98 para áreas impermeáveis e de 74 para áreas livres, considerando classe hidrológica tipo C. Além disso, foram consideradas as recomendações de Martins (2015), que afirma que os valores de CN superestimam as vazões escoadas superficialmente em bacia do município de Belém, sendo mais representativo com redução de 30% do valor de CN.

Com relação aos dados das estruturas de drenagem, a extensão do canal foi retirada de imagens do Google Earth e as dimensões largura e profundidade do canal foram levantadas in loco. Para melhor detalhamento, o canal da Tamandaré foi dividido em trechos sendo coletadas as dimensões nos pontos de montante e de jusante. Enquanto, o valor do coeficiente de Manning para toda a extensão do canal foi de 0,017, definido por Azevedo Netto e Fernández (2015), como valor de referência para canais de concreto em mau estado, com depósitos de lodo no fundo.

Referente aos dados hidrológicos, foram definidas quatro situações de precipitação pluviométrica. Para a modelagem dos volumes escoados pelas sub-bacias, os valores dos eventos precipitados foram calculados a partir de série sintética de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) proposta por Souza et al. (2012) para o município de Belém, conforme a Equação 2.

$$i = 960,5846 * Tr^{0,0954} / ((t + 9,7993)^{0,7245}) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde o i é a intensidade pluviométrica (mm/h); Tr é o tempo de retorno (ano); e t é a duração da chuva (min).

O tempo de retorno utilizado foi de 25 anos, valor usual para dimensionar a capacidade de estruturas de macrodrenagem. Enquanto, as durações dos eventos pluviométricos avaliados foram de 1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h, haja vista que caracterizam eventos pluviométricos de longa duração e interação com o pico de maré.

Na modelagem hidrodinâmica também foram considerados os efeitos de maré alta da baía do Guajará no canal de drenagem. Para isso, foi utilizada as medições horárias do nível de água registrada pela Marinha do Brasil no Porto de Belém, estando localizado a 2,7 km de distância do exutório da bacia. A fim de relacionar eventos extremos, foi considerado o maior registro de nível de água verificado na série histórica disponível.

Posteriormente, foi realizado a implementação dos dados de entrada no SWMM, considerando a modelagem hidrodinâmica de 5 cenários (precipitação pluviométrica de 1,5 h, 3 h, 6 h, 12 h e maré alta) de escoamento no canal de drenagem: as quatro condições de precipitação pluviométrica, sem influência do corpo receptor, permitindo verificar a eficácia do canal de drenagem no escoamento do volume precipitado de grande tempo de recorrência; e em condição de maré alta, verificando nível de água (NA) máximo que a baía do Guajará pode atingir no interior do canal de drenagem, sem a utilização de medidas de contenção.

Na última etapa foram simulados mais 4 cenários, sendo o escoamento dos diferentes eventos de precipitação pluviométrica em momento de maré alta, considerando a interação hidrodinâmica dos dois fatores hidrológicos na condição de coincidência dos picos de precipitação e maré como a pior situação para o escoamento das águas pluviais na bacia, visto que, mesmo durante precipitações pluviométricas de baixa intensidade, já foram verificados diversos casos de inundação na bacia da Tamandaré, quando esses dois fatores estão ocorrendo simultaneamente. Para estabelecer a condição crítica, o NA máximo da maré foi ajustado para coincidir com o instante em que ocorreria o pico de escoamento dos eventos de precipitação pluviométrica no exutório da bacia. Desse modo, foi possível verificar as áreas que podem ser afetadas por inundação durante a inter-relação de eventos extremos de precipitação pluviométrica e de maré alta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bacia da Tamandaré tem forma pouco irregular com índice de compacidade de 0,69, indicando tendência natural a ocorrência de cheias. Na pesquisa a área de contribuição da bacia foi dividida em 27 áreas de contribuição (Figura 2), de acordo com as condições topográficas e com as zonas de influência das galerias de drenagem afluentes ao canal. Essas áreas de contribuição apresentam características de uso e ocupação do solo semelhantes, com reduzida variação nos valores dos dados relacionados às parcelas permeáveis e impermeáveis (neq e CNeq), exceto nas áreas de contribuição 14 e 15, que são as áreas com maior parcela permeável na bacia, devido à construção de praça pública e ao tombamento de imóvel impedirem a ocupação do território. Vale comentar que os valores de CN tiveram redução de 30% do valor total, tendo sido encontrado valores próximos ou superiores a 90, conforme o esperado para área urbana (SOARES et al., 2017).



Figura 2: Sub-bacias que contribuem para o escoamento pluvial até o canal da Tamandaré no SWMM.

O canal da Tamandaré apresenta baixa declividade, com largura média de 10 m e profundidade variada ao longo de seu comprimento, devido às vias que passam sobre o canal. No caso dos trechos do canal com seção aberta, a profundidade média foi de 2,35 m (profundidade na jusante do canal atinge 2,80 m), enquanto, a profundidade média com as pontes sobre o canal foi de 1,94 m, gerando redução de 17,52% da altura disponível para o escoamento. Entretanto, a maior redução de área transversal do canal ocorre próximo à montante do canal, devido a travessia da Avenida São Pedro sobre o canal, reduzindo a altura à 0,60 m e largura à 4,80 m ao longo de 111,53 m de extensão.

O impacto hidráulico dessa brusca redução de área molhada disponível do canal é a possibilidade da ocorrência de remanso, elevando o NA no trecho de cabeceira do canal em momentos de precipitação pluviométrica intensa. Na Tabela 1 é apresentada a intensidade de eventos sintéticos de média e longa duração no município de Belém, com grande tempo de recorrência, e suas respectivas alturas precipitadas.

Tabela 1: Precipitações pluviométricas de Belém calculadas para TR 25 anos.

PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	DURAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA				UNIDADE
	1,5	3	6	12	
Intensidade	45,51	29,19	18,01	11,00	mm/h
Total Precipitado	69,76	87,58	108,03	132,04	mm
Acréscimo	-	25,54	23,36	22,22	%

As simulações demonstraram que o canal da Tamandaré tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações (Figura 3), mesmo com condições estruturais em mau estado de conservação, ou seja, não foram identificados riscos de inundação quando não há influência da maré. Além disso, foi confirmado que a redução da área transversal (Seção 2) no trecho de montante do canal causa grande impacto negativo para as condições hidráulicas durante o escoamento pluvial, sendo agravada com o aumento da intensidade da chuva. Desse modo, ressalta-se que no planejamento do sistema viário deve ser observado o impacto à montante, quando causar modificações em estruturas de drenagem.

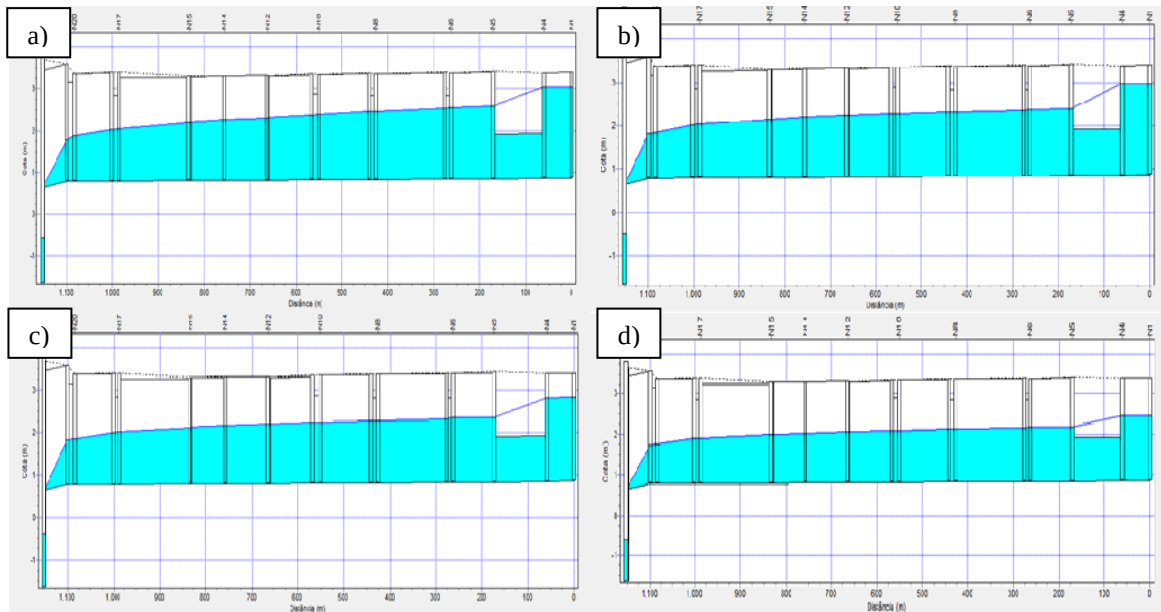


Figura 3: Nível de água no canal da Tamandaré durante precipitação de 1,5 h (a), 3 h (b), 6 h (c) e 12 h (d).

Além das águas pluviais, o canal da Tamandaré ainda recebe influência da baía do Guajará, podendo alterar o comportamento do escoamento no canal em momento de maré alta. O maior nível de água (NA) com registrado no Porto de Belém ocorreu em fevereiro de 1980, quando atingiu cota de 4,24 m (RN da Marinha), valor bem acima dos valores das marés de sizígia da baía do Guajará que, normalmente, atingem 3,60 m (Santos et al., 2014). Ao compatibilizar o valor para a RN da CODEM (utilizada como referência no município de Belém), o NA corresponde à cota 3,44 m.

Na modelagem dos efeitos de maré alta, foi realizada simulação sem ocorrência de precipitação pluviométrica, cenário em que foi observado evento de inundação na bacia da Tamandaré (inundação fluvial). Na Figura 1 é apresentado o NA alcançado pela baía do Guajará na estrutura de macrodrenagem da Tamandaré, causando inundação sem transbordo do canal (inundação atinge os dispositivos de drenagem, como bocas-de-lobo, a partir das galerias que chegam ao canal).

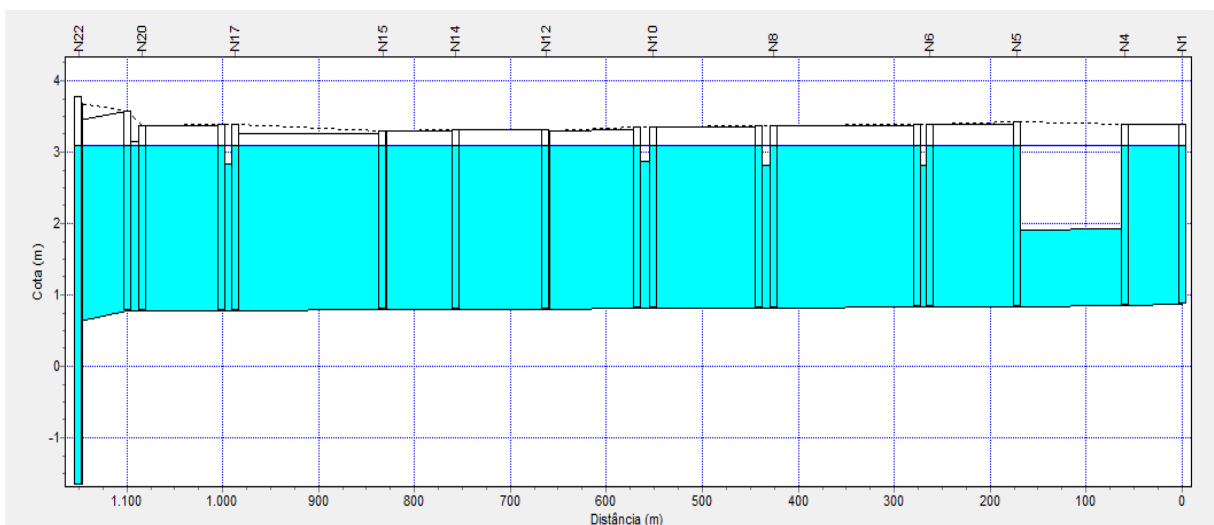


Figura 1: Nível de água gerado por intrusão de maré alta no canal da Tamandaré.

As simulações envolvendo a coincidência dos eventos extremos de maré e precipitações pluviométricas de média e longa duração e grande tempo de recorrência foram realizadas para identificar as áreas afetadas. Todos os cenários simulados resultaram em extravasamento do canal, com aumento significativo da mancha

de inundação, que cresceu de 22,30 a 29,13 vezes em relação à área afetada apenas pela maré alta. Esses resultados confirmam o citado por Berndtsson et al. (2019), de que a interação das águas fluviais com as pluviais amplia a magnitude dos eventos de inundação, gerando impactos mais severos em áreas urbanas, que aceleram o escoamento pluvial até baixos da bacia. Na Figura 5 é representada a área afetada pela maré alta e ao relacionar a maré com a precipitação pluviométrica.

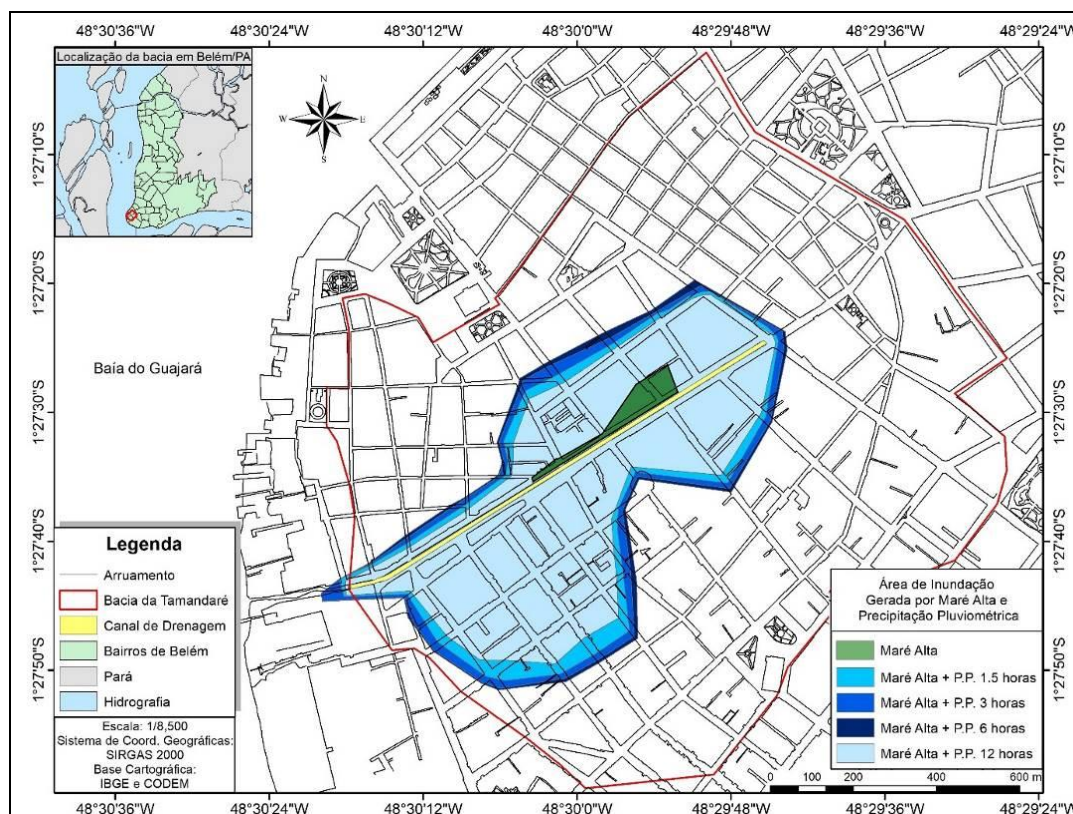


Figura 5: Mancha de inundação gerada na bacia da Tamandaré a partir da interação de precipitação pluviométrica e maré.

A ampliação da área inundada também é formada pelas peculiaridades topográficas da bacia, que apresenta cotas altimétricas homogêneas em pontos baixos, fazendo com que a água extravasada do canal atinja grandes áreas. As simulações permitiram identificar que a precipitação pluviométrica de 12 horas causa menor impacto de inundação (mancha de inundação de 373.451 m²), pois parte do volume precipitado é escoado anteriormente e posteriormente ao momento de maré alta, reduzindo volume pluvial no momento de pico da maré. Enquanto, o impacto das outras durações de precipitação pluviométrica foi crescente, aumentando a mancha de inundação para 426.824 m² durante a precipitação de 1,5 h; para 469.814 m² durante precipitação de 3 h; e 492.358 m² durante precipitação de 6 h. Esse último evento chuvoso gerou o maior impacto, afetando 8,72 km de vias (27,64% do total) e 1.671 domicílios (31,79% do total), em mancha de inundação correspondendo a 28,19% de toda a área da bacia.

Nesse sentido, foi identificado que a bacia da Tamandaré está sujeita a ocorrência de grandes eventos de inundação na coincidência de eventos extremos de precipitação pluviométrica de diferentes durações e de maré alta, sendo necessária a implementação de medidas para conter (reservação) e/ou para garantir o escoamento (bombeamento) do volume pluvial em momentos de maré alta.

CONCLUSÕES

Na caracterização das sub-bacias que contribuem para o direcionamento de precipitações pluviométricas até o canal de drenagem foram observados resultados homogêneos, quando relacionados às superfícies que compõem as áreas permeáveis e impermeáveis da bacia, demonstrando que valores médios de coeficiente de Manning e de curve number podem ser representativos para modelagem de áreas densamente urbanizadas.

A modelagem hidrodinâmica de eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações (1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h) com TR de 25 anos confirmam que o canal de drenagem possui capacidade hidráulica para escoar o volume precipitado, mesmo com área de contribuição densamente urbanizada, quando não há influência do corpo receptor.

Na análise do nível de água da baía do Guajará, que invade o canal de drenagem, ficou confirmada a ocorrência de inundação em momentos de maré alta (inundação fluvial) acima de 4,24 m, com área afetada de 16.026 m², demonstrando a falta de planejamento na ocupação da bacia, que permitiu o desenvolvimento urbano em área de várzea, característica largamente observado em cidades amazônicas.

Desse modo, foi constatado que o regime fluvial é determinante para a ocorrência de inundação na bacia da Tamandaré, devendo ser impedido o desaguamento de águas pluviais em momentos de cheia do corpo receptor, quando as estruturas de drenagem são impactadas pelas marés.

Assim, é indispensável que as comportas inoperantes da bacia sejam reativadas e complementadas com outros dispositivos de drenagem (reservatórios e/ou bombeamento), reduzindo o volume pluvial escoado pelo canal nessa bacia densamente urbanizada durante a coincidência de precipitação pluviométrica e maré alta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERNDTSSON, R. et al. *Drivers of changing urban flood risk: A framework for action*. Journal of Environmental Management, v. 240, p. 47-56, 2019.
2. CABRAL, J. J. S. P. et al. Modelos Computacionais para Drenagem Urbana. In: Righetto Antônio Marozzi (Eds.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. ABES, Rio de Janeiro, 2019.
3. Dubbelboer, J. et al. *An Agent-Based Model of Flood Risk and Insurance*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, v. 20 n. 1, p. 1-26, 2017.
4. FEITOSA, F. F. S. et al. Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para atenuação de picos de cheia na cidade do Crato-CE, Brasil. AIDIS, v.13 n.2, p.485-499, 2020.
5. FORMIGA, K. T. M. et al. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21 n. 4, p. 697-707, 2016.
6. GALVÃO, D. C. A estrutura da urbe: uma relação sistêmica. Humanae, v. 8 n. 2, p. 1-12, 2014.
7. MIGUEZ, M. G., VERÓL, A. P., REZENDE, O. M. Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade. Elsevier: Rio de Janeiro, 2015.
8. NYLANDER, J. D. A. Avaliação da Utilização de Comporta em Eventos Extremos de Precipitação Pluviométrica e de Maré no Canal de Drenagem da Tamandaré. Belém. 2019. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Pará, 2019.
9. SANTOS, K. A.; RUFFINO, I.A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22 n. 5, p. 943-952, 2017.
10. SOARES, M. R. G. J. et al. Eficiência do método curve number de retenção de águas pluviais. Mercator, v. 16, n. 1, p. 1-16, 2017.
11. SOUZA, R. O. R. de M. et al. Equações de Chuvas Intensas para o Estado do Pará. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 2012.
12. TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados, v. 22 n. 63, p. 97-112, 2008.