



Modelagem Bidimensional para a Verificação Hidráulica da Canalização de um Trecho do Rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil)

Gastão Cerquinha da Fonseca Neto¹, Marcos Antonio Barbosa da Silva Junior², Arivânia Bandeira Rodrigues³, Alfredo Ribeiro Neto⁴, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral⁵

¹ Doutorando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) na UFPE. E-mail: gastaoacerquinha@gmail.com; ² Doutorando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) na UFPE. E-mail: marcos15barbosa@hotmail.com; ³ Mestranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) na UFPE. E-mail: arivania_@hotmail.com; ⁴ Professor do Departamento de Engenharia Civil na UFPE. E-mail: alfredo.ribeiro@ufpe.br; ⁵ Professor do Departamento de Engenharia Civil na UFPE e UPE. E-mail: jcabral@ufpe.br.

Artigo recebido em 08/04/2020 e aceite em 26/11/2020

RESUMO

O processo de densificação nas cidades provoca a perda de ambientes naturais, consequentemente reduz as áreas permeáveis, ampliando os fenômenos das inundações urbanas. As medidas mitigadoras geralmente envolvem elevados custos e nem sempre são confiáveis, devido às incertezas de projeto e variáveis naturais de difícil controle e quantificação, principalmente relacionadas às mudanças climáticas. Nesse cenário, a bacia do rio Fragoso, localizada em sua maior parte na cidade costeira de Olinda, registrou recentemente inundações que afetaram extensas áreas, provocando o poder público a realizar obras de canalização e alargamento da calha do rio. Assim, este trabalho objetiva avaliar a confiabilidade de medidas estruturais implementadas em ambientes urbanos costeiros e de baixa elevação, sujeitos às variações da maré. Para isso, foram utilizados os *softwares*: HEC-GeoHMS para processamento dos dados geoespaciais de topografia, com dados de alta resolução; HEC-HMS 4.2.1 para modelagem hidrológica; e HEC-RAS 5.0.3 para modelagem hidráulica bidimensional, com representação de manchas de inundação através da ferramenta RAS Mapper. Foi simulado o evento chuvoso de 30 de maio de 2016 para dois cenários: o atual, nas condições naturais do rio; e o futuro, com a obra de canalização concluída. Os resultados mostraram que a intervenção seria hidráulicamente satisfatória, permitiria o escoamento das vazões, conseguiria reduzir cerca de 42,32% das áreas urbanas inundadas, mas não evitaria o alagamento de áreas marginais que são naturalmente muito baixas.

Palavras-chave: inundação urbana, macrodrenagem, HEC-HMS, HEC-RAS.

Bidimensional Modeling for the Hydraulic Verification of the Channeling of a Stretch of the Fragoso river in Olinda (Pernambuco, Brazil).

ABSTRACT

The densification process in cities causes the loss of natural environments, consequently reducing the permeable areas, increasing the phenomena of urban floods. Mitigation measures generally involve high costs and are not always reliable, due to uncertainties in the design and natural variables that are difficult to control and quantify, mainly related to climate change. In this scenario, the Fragoso River basin, located mostly in the coastal city of Olinda, recently registered floods that affected extensive areas, causing the government to carry out canalization and widening the river channel. Thus, this work aims to evaluate the reliability of structural measures implemented in coastal and low elevation urban environments, subject to tidal variations. For this, the following softwares were used: HEC-GeoHMS for processing geospatial topography data, with high resolution data; HEC-HMS 4.2.1 for hydrological modeling; and HEC-RAS 5.0.3 for two-dimensional hydraulic modeling, with representation of flood spots through the RAS Mapper tool. The rainy event of May 30, 2016 was simulated for two scenarios: the current one, in the natural conditions of the river; and the future, with the enlargement and channeling work designed. The results showed that the intervention would be hydraulically satisfactory, would allow the flow of flows, would reduce about 42.32% of the flooded urban areas, but would not prevent the flooding of marginal areas that are naturally very low.

Keywords: flood; macrodrainage, Hydrologic Modeling System, River Analysis System.

Introdução

Os avanços da urbanização sobre os espaços em desenvolvimento, conduzem o

ambiente natural a um cenário de perda da vegetação e impermeabilização do solo, que por sua vez impactam no regime hidrológico das

idades, intensificando as inundações. Nesse sentido, a população aparece como próprio agente causador da densificação e perda de qualidade de vida, saúde e bem-estar, na medida em que ocupam áreas com alto risco de enchentes (Pathak et al., 2020). Além disso, a falta de planejamento no processo de ocupação e desenvolvimento de áreas, exige gastos excessivos em infraestrutura na tentativa de solução dos problemas de drenagem. O mais grave são os impactos em termos de vidas humanas, agravados pelas perdas financeiras que ocorrem com mais frequência (Mu et al., 2020).

Como alternativa para a mitigação das inundações, medidas estruturais de intervenção na drenagem urbana como a canalização, a construção de diques, barragens e bacias de retenção e retenção são comuns no Brasil (Miguez et al., 2016). No entanto, como demonstram Hailegeorgis e Alfredsen (2017), deve-se avaliar a confiabilidade destas estruturas, em razão de fatores que possam minimizar a efetividade destas soluções, como as mudanças climáticas, o aumento da ocorrência de chuvas intensas, além de incertezas nos dados usados para dimensionamento dos projetos, incertezas na seleção da distribuição estatística e estimativas de hietogramas ou vazões de projeto.

Regiões costeiras estão mais vulneráveis às inundações em virtude do nível do mar, visto que em planícies costeiras com baixas altitudes, o sistema de drenagem está sujeito às oscilações da maré, podendo ocorrer sérios cenários de inundação quando combinadas chuvas intensas e maré alta (Silva Junior et al., 2017). Além disso, regiões costeiras, geralmente possuem o nível do lençol freático elevado, o que pode comprometer a capacidade das bacias de retenção, por exemplo, em reduzir os picos de vazões e em manter as vazões de pós-desenvolvimento próximas às de pré-desenvolvimento (Davtalab et al., 2020).

As evidências acerca dos riscos aumentam a importância do engajamento das comunidades na compreensão dos problemas e das necessidades de adaptação (Silva Junior et al., 2020). Assim, faz-se necessário acelerar os mecanismos de resiliência nas cidades, através dos formuladores de políticas públicas que precisam entender a adaptação atual para planejar de forma abrangente e aplicar os recursos de forma eficaz (Georgeson et al., 2016).

Para avaliar o desempenho dessas soluções mitigadoras, antes de sua implantação, é comum o uso de modelos computacionais. Com eles, pode-se criar cenários e simular eventos hidrológicos

para avaliar consequências da adoção de algumas obras de drenagem (Decina e Brandão, 2016).

Nesse contexto, a combinação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos tem sido largamente utilizada, permitindo, por exemplo, estimar: a eficiência na redução da vazão após a construção de estruturas de controle de cheias (Gül et al., 2010); a identificação de áreas potencialmente inundadas por eventos hidrológicos de diferentes tempos de retorno e pelo aumento da urbanização (Nanía et al., 2015; Romali et al., 2018; Welerson e Silva, 2019); e a caracterização do regime de cheias em um grande rio (Ribeiro Neto et al., 2015). Dessa forma, para dar suporte ao estudo de modelos hidrológicos e hidráulicos, diversos autores utilizaram, de forma bem sucedida, os programas HEC-HMS e HEC-RAS (Indrawan e Siregar, 2018; Khalfallah e Saidi, 2018; Duque-Sarango et al., 2019; Zelenáková et al., 2019).

Assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a confiabilidade da implementação de medidas tradicionais de controle de inundações em ambientes urbanos sujeitos à influência da maré, estabelecendo um caminho para a proposição de soluções complementares.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Fragoso está inserida na Região Metropolitana do Recife (RMR), mais especificamente na Unidade de Planejamento Hídrico (UP) 14, GL1 do grupo dos pequenos rios litorâneos, no que se refere às regiões hidrográficas de Pernambuco. Situa-se, em maior parte, no município de Olinda e, uma parte menor, em Paulista e Recife (Figura 1).

O rio Fragoso tem extensão de 14,7 km, desde a nascente até a sua desembocadura, em um estuário em conjunto com o rio Paratibe. Possui área de contribuição de 28,58 km² e os principais afluentes são os riachos Ouro Preto e Bultrins, ambos altamente susceptíveis a inundações (Costa et al., 2016; Cavalcanti et al., 2018).

As inundações e/ou alagamentos ocorrem, normalmente, quando as chuvas mais intensas coincidem com as marés altas (principalmente em eventos de marés de sizígia). Os efeitos da urbanização sobre a rede hidrográfica também estão intimamente ligados ao aumento da vazão máxima, à antecipação do pico de vazão e ao aumento do volume de escoamento superficial (Melo, 2007).

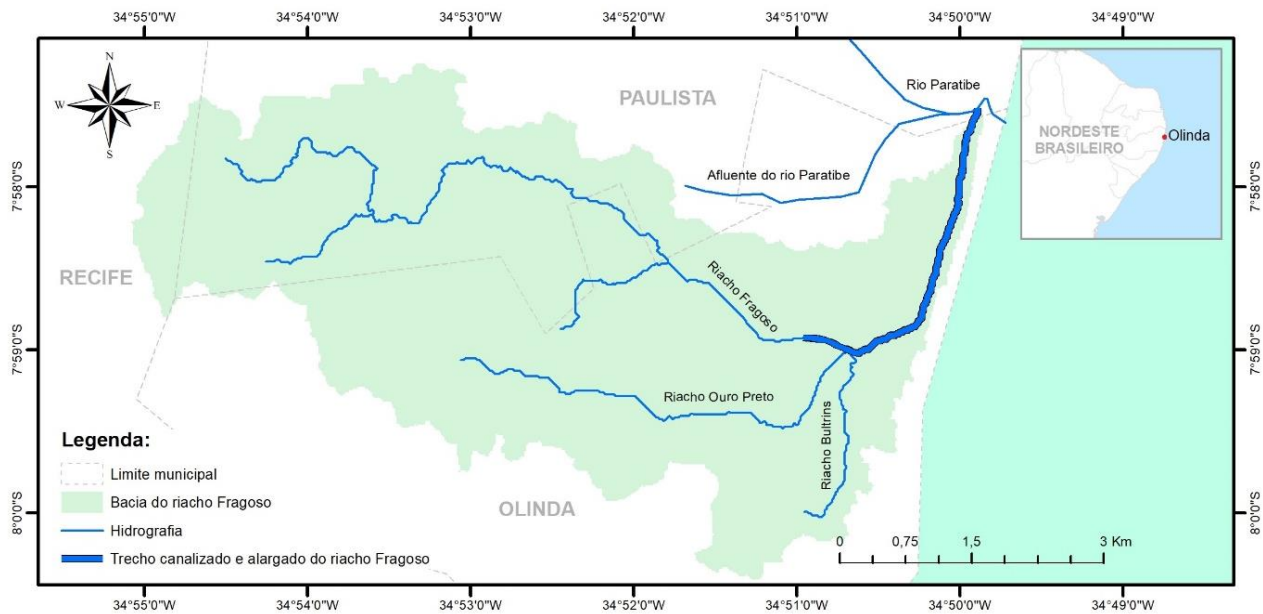


Figura 1. Área de estudo em destaque e localização da bacia do rio Frágoso.

A cidade de Olinda, assim como os outros municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR), podem receber chuvas de intensidade elevada quando o Atlântico está quente e os ventos sopram com grande velocidade em direção ao continente (Silva, 2018).

Exemplos desse fenômeno ocorreram em maio de 2016, quando dois grandes eventos de chuvas intensas causaram sérios transtornos à população de Olinda. No dia 09 do referido mês foi registrada uma chuva acumulada de 239 mm em 22 horas. A Figura 2 mostra a inundação causada pelo evento na bacia do rio Frágoso. No final do mês de maio, no dia 30, foi registrado um total precipitado de 241 mm em 16 horas.



Figura 2. Transbordamento do rio Frágoso na chuva de 09 de maio de 2016.
Fonte: G1 Pernambuco (2016).

Atualmente, o município passa por uma ampliação do seu sistema viário com a melhoria das condições de tráfego na Via Metropolitana Norte. O projeto, promovido por parceria dos

Governos Estadual e Federal, está orçado em R\$ 336 milhões e prevê, ainda, a canalização de parte do rio Frágoso. Como as vias margearão o rio Frágoso, a primeira etapa da obra consiste no alargamento e canalização do curso d'água, em trecho de 4,5 km desde o seu exutório (localizado no rio Paratibe, no município de Paulista).

Parâmetros físicos e topográficos

Em relação à topografia, delimitação e discretização, as informações de altimetria foram disponibilizadas pelo Governo de Pernambuco por meio do Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D. O PE3D é um programa que foi iniciado em 2014 pela Secretaria de Infraestrutura (SEINFRA) e que, através de sensores e câmeras instalados em oito aviões, teve como objetivo o recobrimento do território de Pernambuco usando aerofotogrametria e perfilamento a laser, com precisão altimétrica de 25 cm e resolução espacial de 1 m (Cirilo et al., 2014; Pernambuco, 2016).

A tecnologia utilizada no perfilamento a laser, conhecida por *Light Detection and Ranging* (LIDAR), já foi empregada para reconhecimento de terreno em vários países e permite a obtenção de informações de alta precisão (Pe'eri e Long, 2011).

O princípio de funcionamento do sistema consiste na emissão do feixe laser em direção à superfície terrestre. Este feixe é refletido por obstáculos e captados pelo sensor, onde é registrado o tempo de percurso. Como a área de cobertura de cada feixe é variável de acordo com a altitude, é possível que uma porção do mesmo feixe laser encontre um ou mais objetos antes de atingir o solo. Os encontros geram retornos parciais, denominados de primeiro e último retorno. De

posse destas informações, é possível gerar modelos digitais a partir de ambos os retornos, ou seja, Modelo Digital de Elevação (MDE) ou apenas do último retorno, Modelo Digital de Terreno (MDT). O desvio padrão do laser calculado pelo fabricante é de 50 cm na planimetria e 15 cm na altimetria, sendo esta precisão variável conforme o modelo e ano de fabricação (Cirilo et al., 2011).

A partir dessa base de dados, foi feito o acondicionamento do terreno a fim de obter, por meio do ArcGIS/HEC-GeoHMS, a delimitação das sub-bacias de forma mais fidedigna. Esse processo resultou em oito sub-bacias e viabilizou a obtenção dos seguintes parâmetros físicos: área, declividade, extensão do curso principal, desnível e centroide.

Na bacia do Frágoso, a obra prevista e em execução se trata da canalização de trecho do curso principal, com 4.500 metros de extensão, seções retangulares variando de 30 a 45 metros de largura e profundidade de 4,50 metros, com declividades que variam de 0,02% (na maior parte do trecho) a 0,13%. Os dados foram trabalhados no AutoCAD Civil3D, nas versões estudantis, obtendo-se uma superfície MDT modificada, com a obra do canal finalizada. Essa informação foi utilizada para a simulação do cenário que avalia os efeitos da obra de canalização concluída.

Monitoramento hidrológico e hidráulico

Para a definição e avaliação da chuva de projeto, foram utilizados os dados horários de dez estações pluviográficas do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais). No modelo hidrológico HEC-HMS, foram estimadas séries de chuva para cada sub-bacia a partir do método do Inverso da Distância. O evento simulado ocorreu em 30 de maio de 2016 e provocou uma chuva acumulada de 241 mm, distribuída em 16 horas, como pode ser observado na Figura 3. O período mais intenso de precipitação se concentrou num intervalo de 3 horas, iniciando às 07h00, resultando num total precipitado de 168 mm no posto Jardim Frágoso.

A Figura 4 mostra a distribuição dos postos usados e as isoietas de chuva acumulada na bacia do rio Frágoso, para o evento em questão. De acordo com a equação IDF do Recife (Recife, 2013), a chuva do evento analisado apresentou tempo de recorrência acima de 100 anos.

Foram levantadas as cotas máximas de inundação em 17 pontos inseridos na área mais crítica da bacia (Figura 5), numa extensão aproximada de 2 km, para o evento de 30 de maio de 2016. Tais pontos permitiram a definição da planície de inundação que serviu de referência para calibração de parâmetros nos modelos usados. Em termos médios, verificou-se que a inundação chegou à elevação altimétrica máxima de 4,50 m.

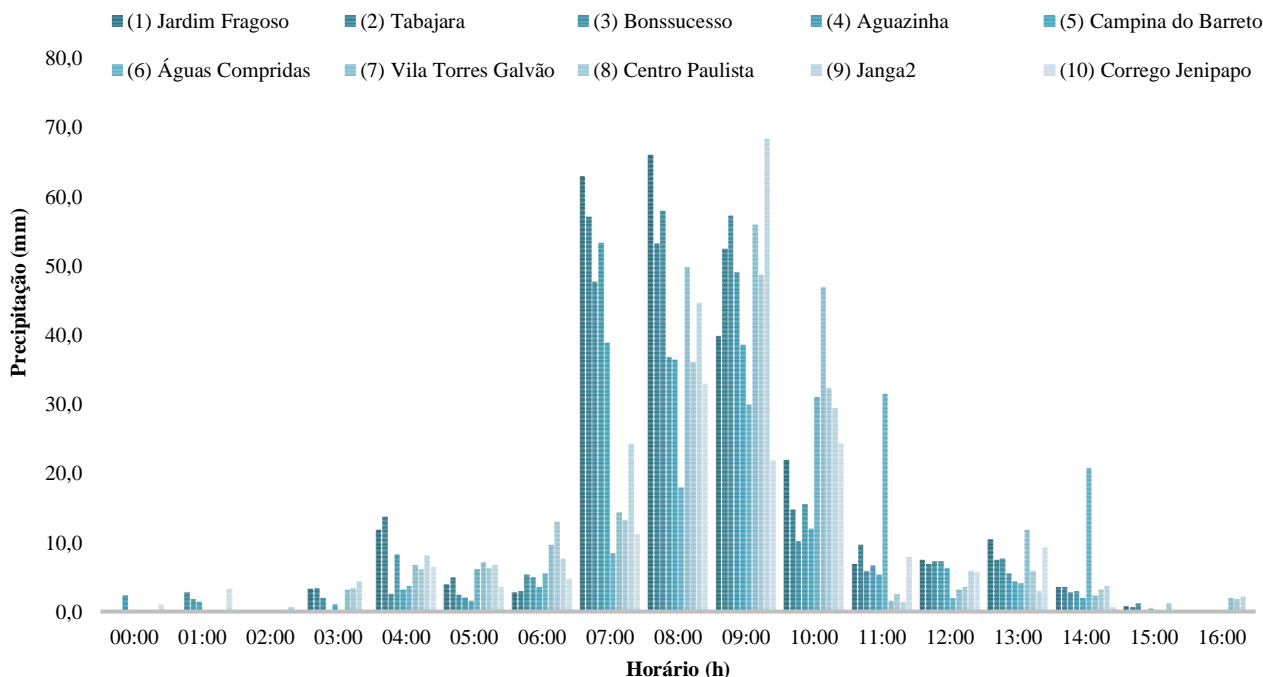


Figura 3. Variabilidade temporal da chuva de 30 de maio de 2016 nos postos da bacia rio Frágoso.

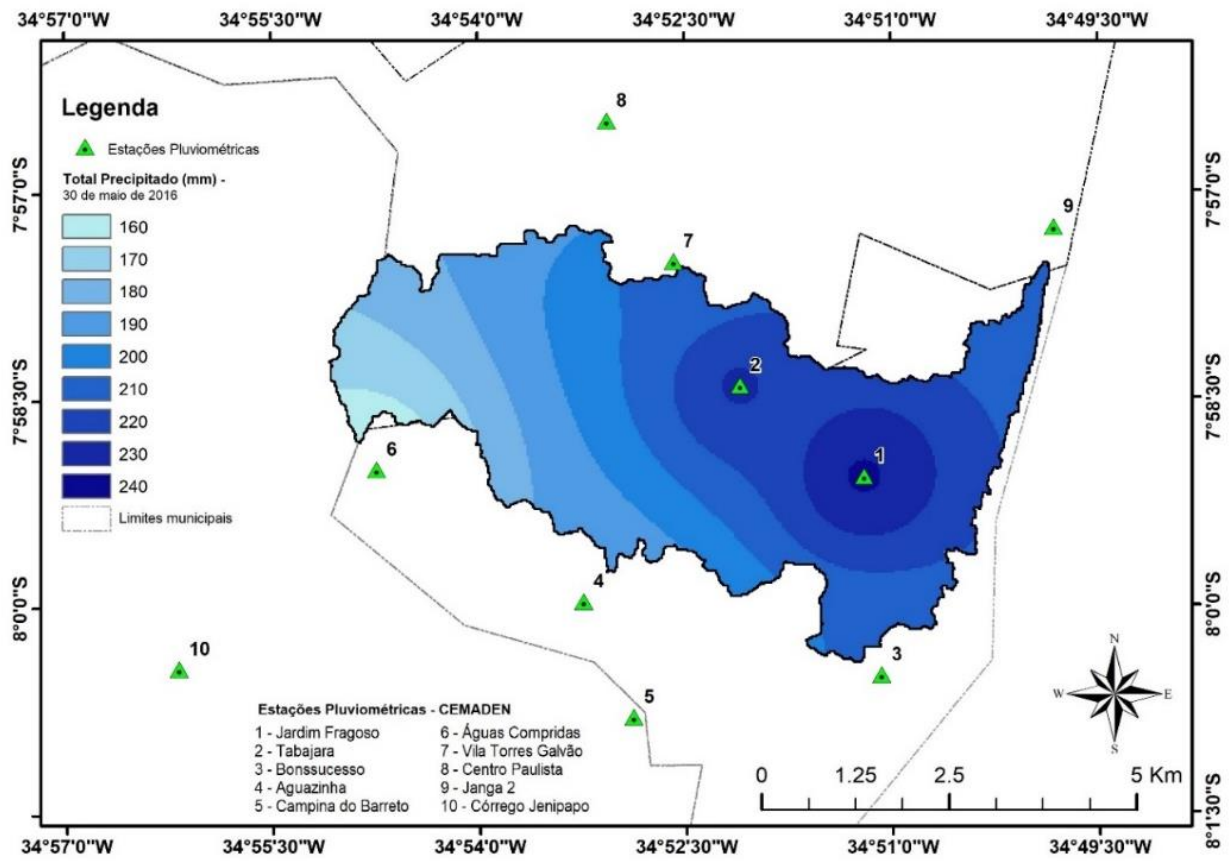


Figura 4. Distribuição dos postos pluviométricos e chuva acumulada em 30 de maio de 2016.

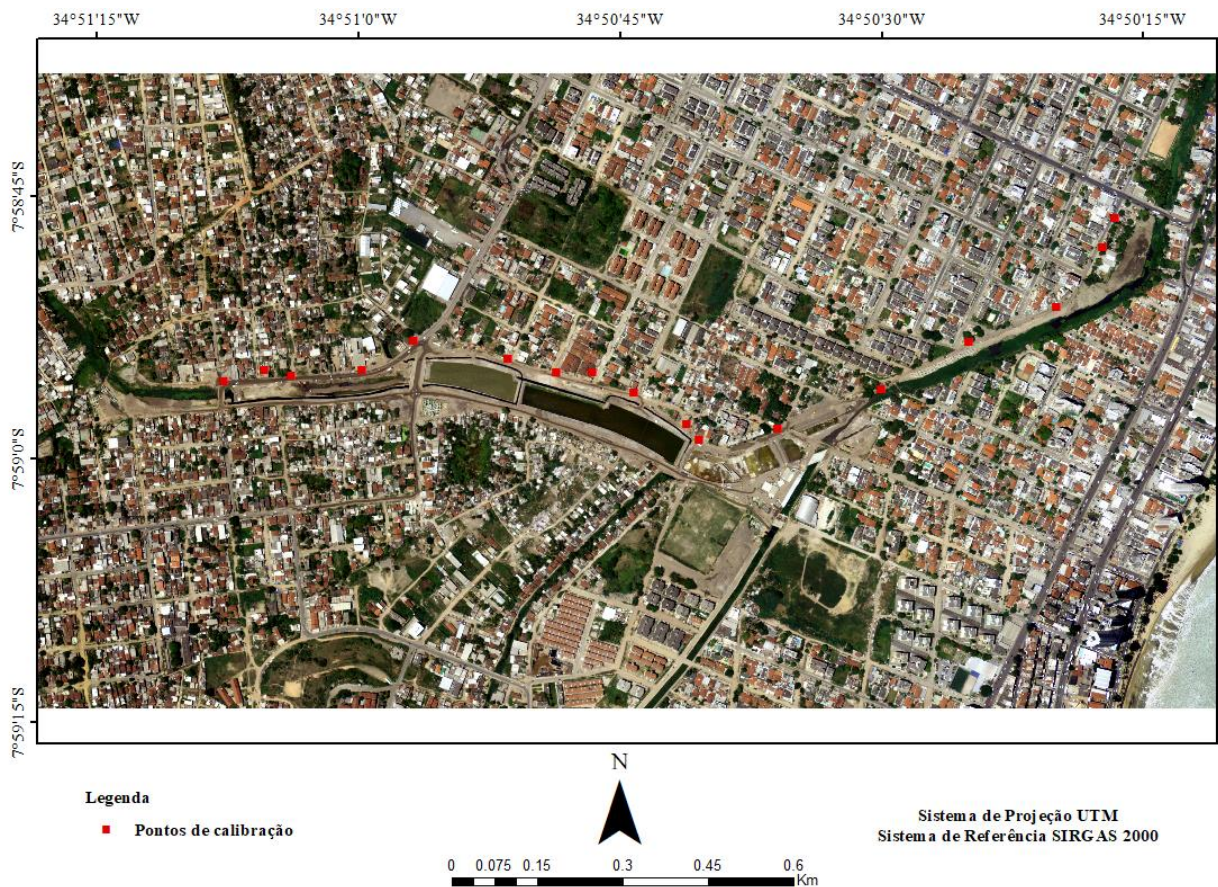


Figura 5. Distribuição dos pontos de máxima cheia medidos para o evento em 30 de maio de 2016.

Modelagem hidrológica-hidráulica

Para a modelagem hidrológica foram utilizados os *softwares* ArcGIS/HEC-GeoHMS e HEC-HMS 4.2.1, ambos desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*US Army Corps of Engineers - USACE*).

No ArcGIS/HEC-GeoHMS foram processados os dados geoespaciais de topografia, precipitação e caracterização física das sub-bacias. No HEC-HMS foram gerados os hidrogramas de escoamento superficial de cada sub-bacia, usando-os, posteriormente, como dados de entrada no HEC-RAS.

A Figura 6 mostra o layout da montagem do modelo hidrológico HEC-HMS. Na Tabela 1 é apresentada a relação das sub-bacias com os ícones atribuídos no HEC-HMS, todas com exutório comum na junção J3.

A transformação da chuva em vazão foi feita pelo método do Hidrograma Unitário do SCS

(*Soil Conservation Service*). O método das perdas adotado foi o Curva Número (CN) do SCS e o tempo de concentração das sub-bacias foi obtido pela fórmula de Kirpich.

Para a definição dos CNs em cada sub-bacia, foram usados os dados sobre as classes de solos, obtidos em mapa da Embrapa (Santos et al., 2011). Com essa informação, e de acordo com a classificação sugerida por Sartori et al. (2005), a bacia do rio Fragoso está inserida no grupo hidrológico A.

Tabela 1. Sub-bacias de contribuição na junção J3.

Sub-bacias	HEC-HMS	Área-km ²
Região do Alto/Médio Fragoso	R50+W150	17,22
Riacho Ouro Preto	W180	6,79
Riacho Bultrins	W170	2,30

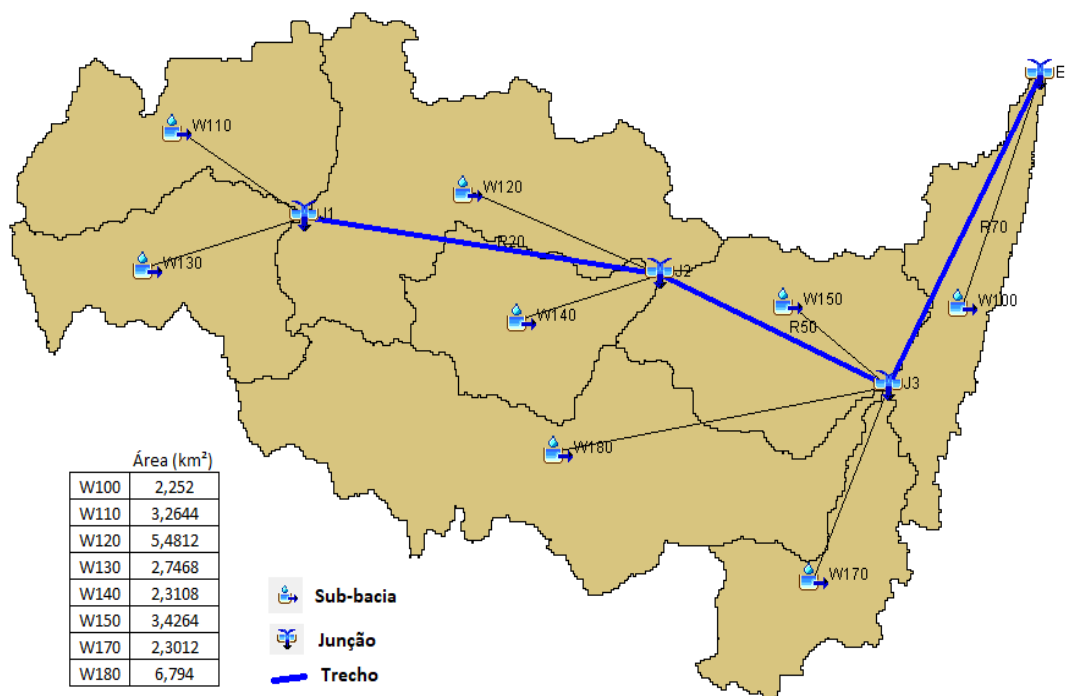


Figura 6. Layout do modelo hidrológico HEC-HMS.

No HEC-HMS também foram atribuídos parâmetros de geometria, comprimento dos trechos principais (R20, R50 e R70, representados neste estudo por Alto, Médio e Baixo Fragoso, respectivamente) e declividade para o cálculo da propagação do hidrograma de cheia pelo método de Muskingum-Cunge (Figura 7). Tal método é bastante vantajoso pois requer poucos dados, além

de ser indicado para rios com baixa declividade, existência de planícies de inundação e em rios sujeitos à maré, adequando-se ao caso estudado, apresentando resultados satisfatórios.

Os valores atribuídos ao coeficiente de Manning, mostrados na Figura 7, foram ajustados, posteriormente, no processo de calibração.

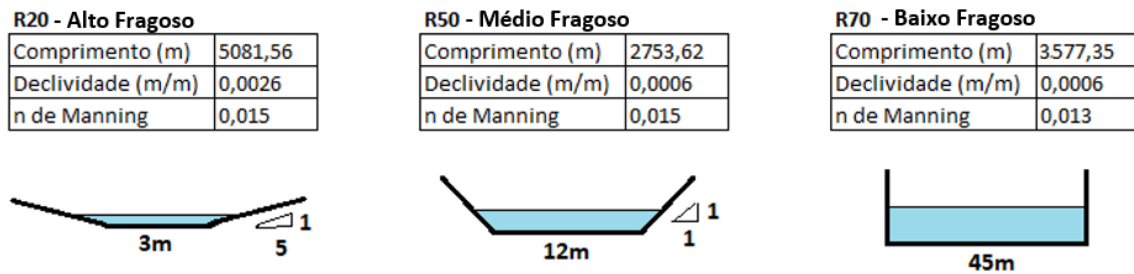


Figura 7. Parâmetros para propagação de vazão pelo método de Muskingum-Cunge.

A modelagem hidráulica foi feita através do *software* HEC-RAS 5.0.3, tendo por base os dados previamente gerados no HEC-GeoHMS e HEC-HMS 4.2.1. Tal modelo de simulação também foi desenvolvido pelo USACE. Dentre as principais funcionalidades do HEC-RAS destacam-se: simulação do escoamento permanente unidimensional e bidimensional (realizada neste estudo); simulação do escoamento não-permanente; e análise de transporte de sedimentos e contornos móveis.

Para a simulação em regime transitório, o modelo utiliza as equações completas de *Saint-Venant* e o esquema de diferenças finitas implícito de quatro pontos (Brunner et al., 2016). As equações de *Saint-Venant* são constituídas pelas equações da continuidade e dinâmica:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{q}{A} = g(S0 - Sf) \quad (2)$$

Onde: A - Área da seção transversal;
 t - Tempo;
 Q - Vazão;
 x - Distância longitudinal no canal;
 q - Vazão de contribuição lateral;
 v - Velocidade da água;
 g - Aceleração da gravidade;
 y - Profundidade da água;
 S0 - Declividade do fundo do rio; e
 Sf - Declividade da linha de energia.

No *software* HEC-RAS foi definido o Sistema Internacional de medidas (SI) em metros para todos os arquivos importados, de modo a

permitir a visualização do modelo esquemático representando a macrodrenagem do rio Frágoso e os demais elementos em projeção UTM e Datum SIRGAS 2000, assim como para computar os dados de vazão em m³/s. Para a simulação do nível da água no rio, foi considerado o regime de fluxo não-permanente e subcrítico.

Como dados de entrada, foram utilizados os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS nas sub-bacias: Região do Alto/Médio Frágoso (R50 + W150); Bultrins (W170); e Ouro Preto (W180). Para saída do sistema, foram consideradas duas regiões (Figura 8): no encontro com o rio Paratibe (saída) e na região costeira (mar), ambas definidas pela cota fixa de 1,50 m, caracterizando uma amplitude média de maré.

A região delimitada no modelo foi subdividida em quadrículas de lado igual a 25 m (Figura 8). Após o cálculo do nível da água em cada curso d'água, foi estimada a extensão das manchas de inundação, assim como as suas profundidades. Este procedimento foi realizado pela ferramenta RAS Mapper disponível no *software* HEC-RAS, onde foi efetuada a sobreposição do nível da água simulado sobre o Modelo Digital do Terreno da bacia, chegando-se à cota máxima simulada de inundação.

Nesse estudo não foram contempladas as contribuições laterais do rio Frágoso em seu trecho final, ou seja, não foi contabilizada a sub-bacia W100. Isso porque, a versão 5.0.3 do HEC-RAS não permitiu a inserção da vazão incremental da sub-bacia W100 ao longo do trecho final do rio e a opção por incluir sua vazão na entrada do sistema, iria superestimar as inundações simuladas em comparação à observada. Assim, o hidrograma da referida sub-bacia foi usado, apenas, no exutório do sistema (na confluência com o rio Paratibe).

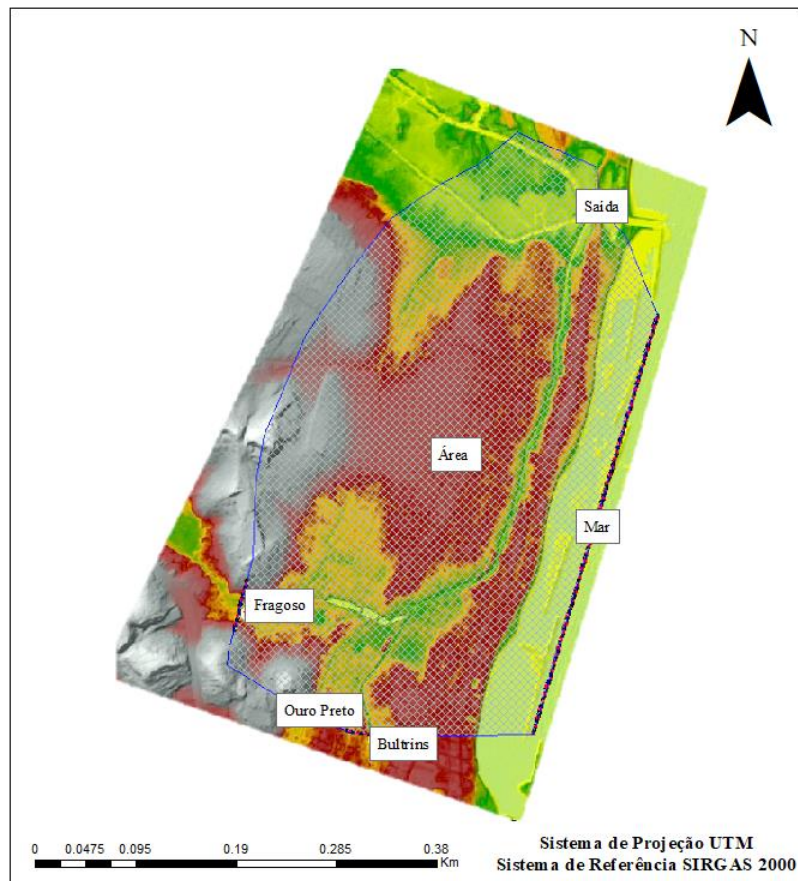


Figura 8. Quadrículas do modelo hidráulico e posição das condições de contorno.

Calibração

Uma grande dificuldade encontrada para calibração de modelos em bacias urbanas está na disponibilidade de dados fluviométricos. Na ausência de sensores de nível ou medidores de vazão, necessários para se processar um estudo de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros, optou-se por uma calibração simplificada, baseada somente no ajuste da cota máxima de inundação simulada em relação à observada.

Os dados observados foram medidos por uma equipe técnica de topógrafos para a mancha de inundação provocada pelo evento de 30 de maio de 2016. Na oportunidade, foi feito o mapeamento e o levantamento das coordenadas geográficas de 17 pontos limitantes da água em região crítica dentro da área de estudo (Figura 5). Esse levantamento serviu de base para a obtenção das cotas máximas alcançadas pela inundação.

De maneira geral, a calibração obtida pôde ser definida como um processo expedito, uma vez que a mesma foi realizada de forma manual, no *software* HEC-HMS, pelo ajuste dos parâmetros: rugosidade de Manning, no modelo de propagação do hidrograma de cheia; e Curva-Número (CN) de cada sub-bacia.

O melhor ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico HEC-HMS foi avaliado na modelagem hidrodinâmica (HEC-RAS/RAS *Mapper*), quando comparadas as cotas máximas simuladas com as observadas nos 17 pontos levantados. Para atestar a calibração feita, foram obtidos os coeficientes de correlação entre as cotas máximas (simuladas e observadas) e de determinação (R^2) para as profundidades máximas (simuladas e observadas). Como regra, para que a qualidade do ajuste dos parâmetros no HEC-HMS, durante a calibração, seja satisfatória, é desejável que o valor de R^2 seja igual ou superior a 0,60 (Silva et al., 2013).

Simulação

As simulações bidimensionais foram feitas no HEC-RAS e consideraram dois cenários, a partir do evento chuvoso de 30 de maio de 2016:

- O atual, para as condições naturais do rio (cenário que caracteriza a calibração) sem alteração do MDT da bacia; e
- O futuro, com a alteração do MDT da bacia de acordo com o projeto de alargamento e canalização de um trecho do rio Fragoso.

Para os cenários analisados, foram gerados perfis hidráulicos, como resultado do HEC-RAS, e

manchas de inundação aplicando a ferramenta RAS Mapper.

Resultados e Discussão

Modelagem no HEC-HMS

Os resultados da modelagem hidrológica consistiram na distribuição das chuvas em todas as sub-bacias da área estudada, para o evento chuvoso simulado, e na geração dos hidrogramas de

escoamento superficial nas sub-bacias do Alto e Médio Frágoso, Bultrins e Ouro Preto (região de montante ao trecho canalizado e modelado).

A distribuição espacial das chuvas, para o evento considerado, se mostrou homogênea entre as sub-bacias com valores de precipitação variando de 171,69 mm a 239,64 mm e coeficiente de variação menor que 10%. Em termos médios, a chuva calculada a partir do método do inverso da distância foi de 214,80 mm (Figura 9).

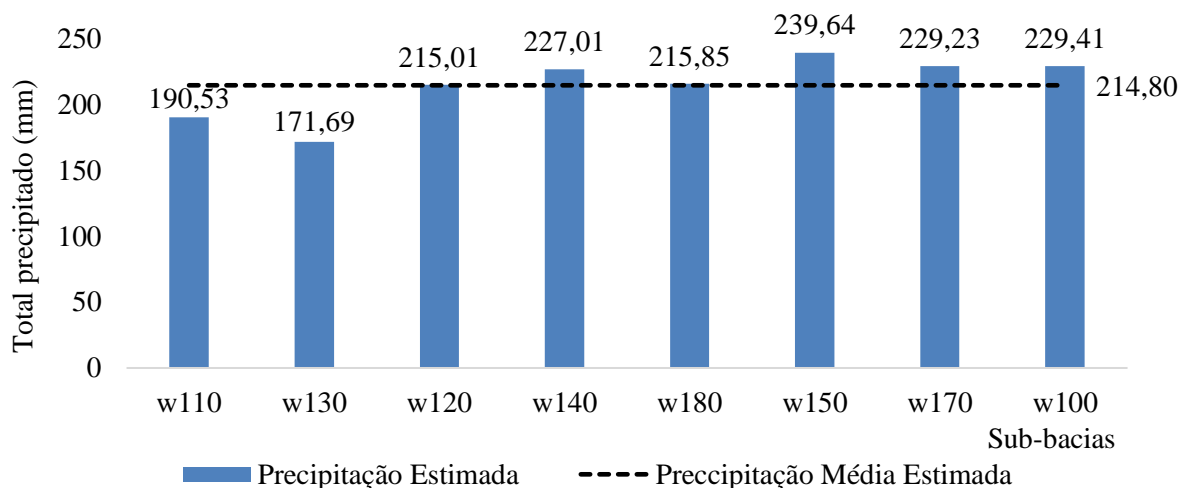


Figura 9. Precipitação acumulada estimada para cada sub-bacia no evento de 30 de maio de 2016.

Os CNs (Tabela 2) foram calibrados manualmente dentro da faixa de valores que caracterizam o uso e ocupação do solo em cada sub-bacia (77 a 51). Esse processo foi conduzido, prioritariamente, pela combinação das análises de imagens de satélite atuais da região, associado aos grupos de solo estabelecidos pelo método SCS (Grupo A – solos arenosos até 1,50 m de profundidade com pouco silte e argila).

Tabela 2. CNs calibrados para cada sub-bacia.

Sub-bacias	CN
• Região do Alto Frágoso:	
W110	64
W130	64
W120	65
W140	70
• Região do Médio Frágoso:	
W180 – Ouro Preto	72
W150	75
W170 - Bultrins	75
• Região do Baixo Frágoso:	
W100	75

A Figura 10 apresenta os hidrogramas de aporte ao modelo hidráulico, com destaque para a

hidrógrafa resultante na junção J3 (a combinação dos hidrogramas das bacias do alto/médio Frágoso, Bultrins e Ouro Preto).

Observa-se que, para uma chuva média de 214,80 mm, a hidrógrafa resultante apresentou uma vazão máxima de 199,70 m³/s, maior que a obtida por Melo (2007), que foi de 153,41 m³/s. Diferença atribuída à chuva de projeto considerada, quando Melo (2007) usou tempo de retorno de 20 anos, neste estudo a recorrência foi maior que 100 anos.

A maior parcela da vazão é gerada pela região do Alto/Médio Frágoso (R50+W150), com vazão de pico de 117,70 m³/s. Tal região, com área de 17,22 km² e um CN médio de 65,75, apresentou condições de vazão máxima similares ao bacia do Córrego do Gregório, 148,70 m³/s para TR de 25 anos (Decina e Brandão, 2016), com área de 17,45 km² e CN médio de 78,82.

Por outro lado, a menor parcela de vazão é gerada pela sub-bacia do riacho Bultrins, com vazão de pico de 26,40 m³/s, valor próximo a vazão obtida por Melo (2007), que foi de 31,59 m³/s. A diferença de valores se dá em razão da metodologia de delimitação da bacia de contribuição, a qual gerou um valor de 3,96 km² para o estudo de Melo (2007), onde foi considerada a área próximo à praia, diferentemente deste modelo, que identificou

topograficamente um divisor que separara parte do escoamento, reduzindo a área para 2,3 km².

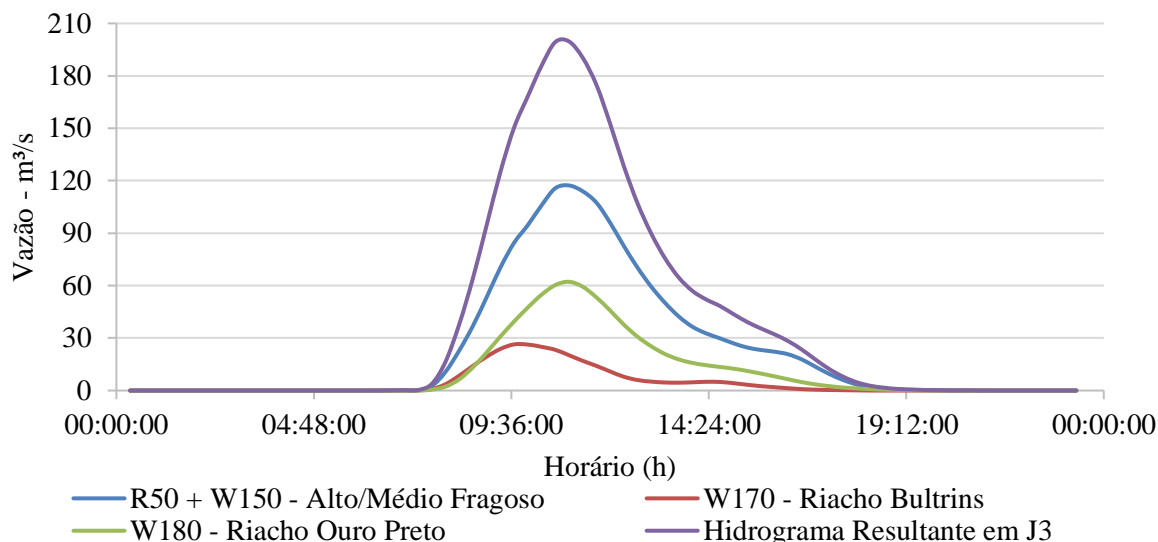


Figura 10. Hidrogramas de aporte, gerados no HEC-HMS, para o modelo hidráulico (HEC-RAS).

O tempo de pico foi o mesmo para a região de Alto/Médio Fragoso e sub-bacia do Ouro Preto, alcançado às 11h00 desde o início da precipitação, concordando com a hidrógrafa resultante em J3, enquanto para a sub-bacia dos Bultrins ocorre às 9h40. Ressalta-se o fenômeno de conjunção dos picos para as diferentes bacias o que tende a agravar as inundações. Nesses casos, a aplicação de reservatórios de retenção poderá reduzir os picos dos hidrogramas de forma a se aproximarem das vazões de pré-desenvolvimento, como observa Vergutz et al. (2019), que aplicou diferentes conformações de reservatórios para tempos de retorno de até 100 anos.

Modelagem no HEC-RAS

A Figura 11 apresenta a relação entre as profundidades simuladas e observadas nos 17 pontos levantados. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9827, mostrando que a calibração dos parâmetros no HEC-HMS foi satisfatória.

A Figura 12 mostra a disposição das cotas máximas de inundação (observada e simulada) com valores bem próximos e coeficiente de correlação de 0,752, mostrando, também, que a calibração foi satisfatória. Cabe ressaltar que a linha de terreno, apresentada no gráfico, não figura o fundo do rio, pois os 17 pontos levantados estão situados na margem do curso d'água (Figura 5).

A comparação dos resultados do modelo com os dados observados em campo permitiu a correção sucessiva dos parâmetros de rugosidade de Manning (n) da calha dos cursos d'água, no software HEC-HMS, (Tabela 3) e cobertura do solo (CN) com consequente calibração. As rugosidades

de Manning nos trechos R20 e R50 corroboram com os valores encontrados por Decina e Brandão (2016) variando de 0,020 a 0,025, para os trechos retangulares e trapezoidais do canal Córrego do Gregório, em São Carlos (SP). No trecho R70, local onde será feita a canalização, inclusive já com parte do trecho canalizado, observou-se que o valor de Manning calibrado esteve entre 0,012 e 0,014, característico de canais com paredes de concreto em naturezas “muito boa” e “boa”, conforme Tucci et al. (1995).

Tabela 3. Rugosidade de Manning (n) calibrados para cada trecho no HEC-HMS.

Trechos	n
R20 – Alto Fragoso	0,020
R50 – Médio Fragoso	0,020
R70 – Baixo Fragoso	0,013

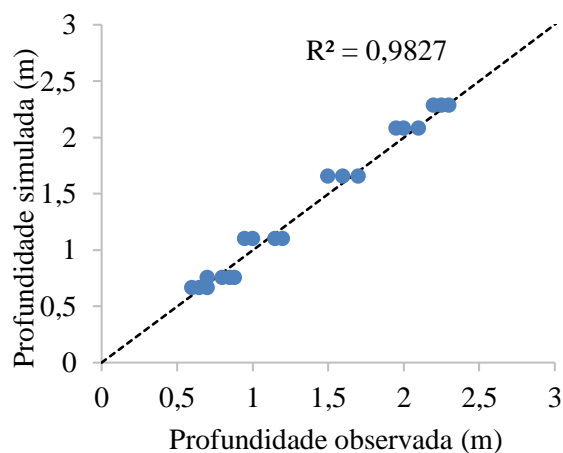


Figura 11. Resultado da calibração nos pontos de controle a partir das profundidades máximas.

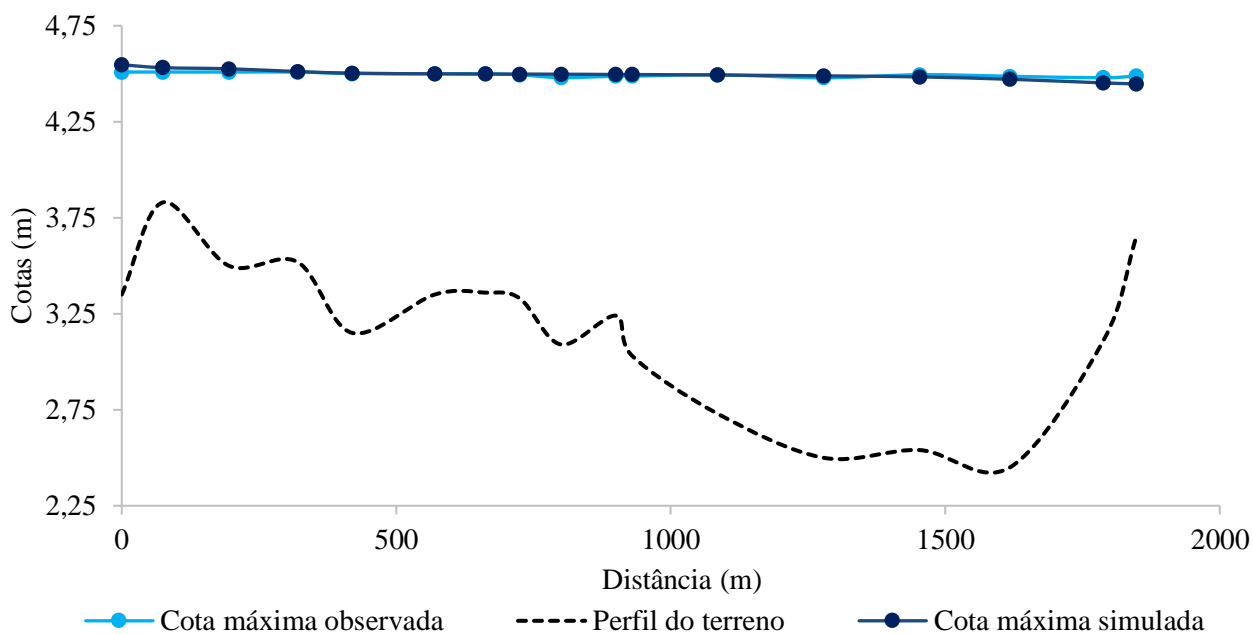


Figura 12. Resultado da calibração nos pontos de controle a partir das cotas de elevação.

A Figura 13 mostra o comparativo entre as manchas de inundação simuladas para os cenários atual e futuro. A análise das manchas evidencia os riscos a que áreas densamente urbanizadas estão submetidas em razão, muitas vezes, da negligência

em explorar as funcionalidades dos riachos urbanos como elementos estruturadores do ordenamento ambiental e territorial, como observam Costa et al. (2016).

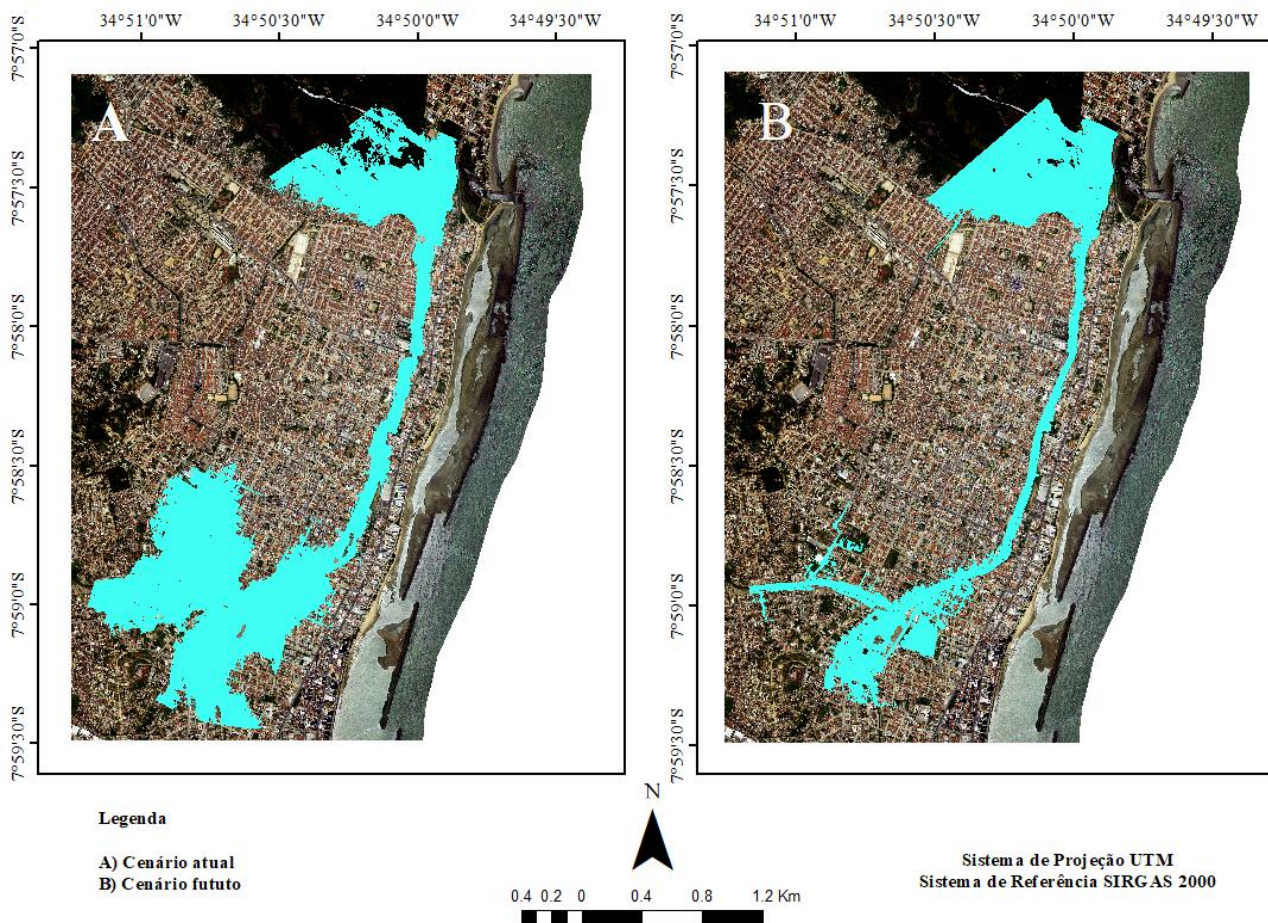


Figura 13. Manchas de inundação com nível máximo da água para o cenário atual (A) e futuro (B).

Ahilan et al. (2018) demonstram que a preservação das planícies de inundação pode atenuar em 23% os picos de cheias com tempo de retorno de 30 anos, devido a possibilidade de armazenamento que essas áreas dispõem. Além disso, o mesmo estudo ainda apresenta que as

planícies preservadas podem reduzir em 28% os picos para eventos de cheias de 500 anos de tempo de retorno, o que corresponderia a uma cheia de 50 anos de magnitude.

A Figura 14 mostra os perfis de nível máximo para os dois cenários.

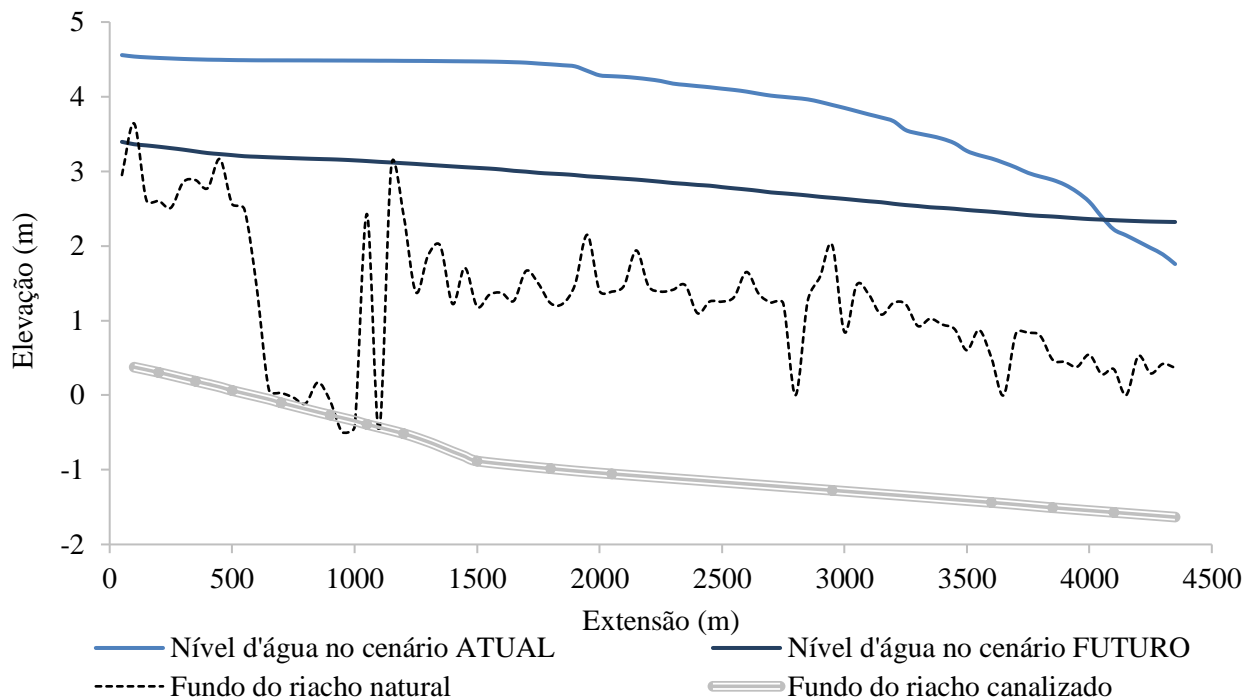


Figura 14. Perfis de nível máximo da água para os cenários atual (s/ canalização) e futuro (c/ canalização).

Como se observa na Figura 13, haverá uma redução das áreas alagadas em cerca de 42,32%, tanto no início do trecho (no território do bairro de Jardim Atlântico), quanto ao longo do seu curso. É importante observar que apesar de reduzir as áreas alagadas, ainda existem áreas muito baixas nas margens do rio que vão sofrer inundações.

Assim como Sá et al. (2016) identificaram a aceleração do escoamento e a redução dos níveis d'água em virtude da canalização, para um trecho do rio Granjeiro, na cidade do Crato/CE, os resultados também demonstram esse efeito no trecho canalizado do rio Frágoso. Enquanto no rio Granjeiro houve uma redução de 2,52 metros, para uma vazão de pico de 256,30 m³/s, a presente simulação identificou reduções máximas de 1,50 metros para a vazão de pico de 199,70 m³/s.

Uma noção melhor do rebaixamento no nível d'água pode ser visto na Figura 14. Destaque para o rebaixamento do fundo do canal, previsto no projeto, que é bem relevante e configura um canal funcionando, também, como reservatório. Entre as distâncias 500 m e 1.000 m há um rebaixamento do

terreno no cenário atual justificado pela obra que se encontrava em andamento nesta região.

Nota-se também, que apesar de aumentar a capacidade hidráulica do rio e reduzir as áreas inundadas, a canalização irá acelerar o escoamento e transferir grande parte do volume de água para jusante, na confluência com o rio Paratibe.

Conclusão

O manejo das águas pluviais urbanas constitui uma etapa importante no gerenciamento das cidades, devendo ser pensada em conjunto com outros temas, como: uso e ocupação do solo, habitação, transporte e meio ambiente, a fim de que se possa chegar a soluções efetivas sem colocar em risco a vida da população. Assim, pensar a drenagem na cidade configura uma atividade complexa que requer um estudo aprofundado de todos os fatores envolvidos. Corre-se o risco, portanto, de propostas que não resolvam o problema, que o agravem ou, ainda, que o transfiram para outras regiões.

A calibração, realizada a partir de pontos de cota máxima teve resultado satisfatório. Mesmo havendo variações no registro do nível de máxima cheia, que se deve ao erro associado às marcações, o perfil varia em torno de 4,50 m, o que podemos inferir, razoavelmente, ser a cota máxima para o evento de 30 de maio de 2016.

A simulação da canalização do rio Fragoso comportou-se de forma bastante satisfatória no escoamento rápido das águas pluviais, reduzindo as regiões alagadas e, conseqüentemente, as perdas materiais e os danos à infraestrutura. Entretanto, a concretagem do fundo do rio representa uma redução na recarga do lençol freático subterrâneo proporcionada pela conexão rio-aquífero, de forma que o fluxo de base tenderá a se extinguir.

Mesmo com a implementação da medida estrutural de alargamento e aprofundamento da calha, áreas muito baixas localizadas nas regiões do entorno do rio poderão sofrer inundações. Além disso, outros fatores também podem contribuir para a inundação, como o nível d'água no exutório do sistema (maré alta e cheia no rio Paratibe) associado ao período mais intenso da chuva em dado tempo de retorno. Estes cenários demonstram, confirmando a hipótese inicial, que medidas estruturais podem não ser confiáveis, necessitando outras abordagens. Nesse contexto, a implementação de medidas estruturais complementares, como bacias de retenção, bacias de detenção ou diques podem contribuir para a redução das vulnerabilidades na região. Da mesma forma, medidas não estruturais como o mapeamento das regiões de risco e medidas de reordenamento urbano podem mitigar as perdas na ocorrência de grandes cheias. Destaca-se, também, a importância da elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana da cidade, que estude as águas pluviais de forma ampla, analisando, de forma integrada, o escoamento pluvial nos rios e riachos em conjunto com a microdrenagem das ruas, entendendo melhor as regiões críticas e propondo soluções mais sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelas bolsas de doutorado e mestrado do segundo e terceiro autores.

Referências

- Ahilan, S., Guan, M., Sleigh, A., Wright, N., Chang, H., 2018. The influence of floodplain restoration on flow and sediment dynamics in an urban river. *Journal of Flood Risk Management* 11, 986–1001.
- Brunner, G.W., Warner, J.C., Wolfe, B.C., Piper, S.S., Marston, L., 2016. *River Analysis System: Applications Guide*.
- Cavalcanti, D.M.P., Silva, E.C., Nery, N., 2018. Os riachos urbanos do Bultrins como elementos estruturadores da paisagem. *Revista Humanae* 12, 1–45.
- Cirilo, J.A., Alves, F.H.B., Silva, L.A.C., Campos, J.H.A.L., 2014. Suporte de informações georreferenciadas de alta resolução para implantação de infraestrutura e planejamento territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7, 755–763.
- Cirilo, J.A., Montenegro, S.M.G.L., Asfora, M.C., Torres Filho, C.O., 2011. Controle e previsão de cheias no estado de Pernambuco, Brasil: aspectos hidrológicos e ações de reconstrução. XIV World Water Congress, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil.
- Costa, A.M.M., Melo, G.C.F., Cruz, M.R.S., Girão, O., 2016. Análise inicial do uso e ocupação em trecho do riacho Ouro Preto – Olinda/PE - e sua influência para a potencialização de eventos de inundações. *Revista de Geociências Do Nordeste* 2, 143–151.
- Davtalab, R., Mirchi, A., Harris, R.J., Troilo, M.X., Madani, K., 2020. Sea Level Rise Effect on Groundwater Rise and Stormwater Retention Pond Reliability. *Water* 12, 1–18.
- Decina, T.G.T., Brandão, J.L.B., 2016. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21, 207–217.
- Duque-Sarango, P., Patiño, D.M., López, X.E., 2019. Evaluación del sistema de modelamiento hidrológico HEC-HMS para la simulación hidrológica de una microcuenca andina tropical. *Información Tecnológica* 30, 351–362.
- G1 Pernambuco, 2016. Imagens aéreas mostram o transbordamento do Canal do Fragoso, em Olinda, em maio de 2016. Disponível: <<https://g1.globo.com/pernambuco/noticia/construcao-de-duas-rodovias-as-margens-do-canal-do-fragoso-em-olinda-comeca-em-janeiro-de-2017.ghtml>> Acesso: 15 jan. 2020.
- Georgeson, L., Maslin, M., Poessinouw, M., Howard, S., 2016. Adaptation responses to climate change differ between global megacities. *Nature Climate Change* 6, 584–588.
- Gül, G.O., Harmancıoğlu, N., Gül, A., 2010. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural

- flood control measures. *Natural Hazards* 54, 245–260.
- Hailegeorgis, T.T., Alfredsen, K., 2017. Analyses of extreme precipitation and runoff events including uncertainties and reliability in design and management of urban water infrastructure. *Journal of Hydrology* 544, 290–305.
- Indrawan, I., Siregar, R.I., 2018. Analysis of flood vulnerability in urban área: A case study in deli watershed. *Journal of Physics: Conference Series* 978, 1–7.
- Khalfallah, C.B., Saidi, S., 2018. Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 142, 44–51.
- Melo, M.J.V., 2007. Medidas estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na Bacia do Rio Fragoso na cidade de Olinda. Tese (Doutorado). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Miguez, M.G., Veról, A.P., Rezende, O.M., 2016. Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade, 1ª ed. Elsevier, São Paulo.
- Mu, D., Luo, P., Lyu, J., Zhou, M., Huo, A., Duan, W., Nover, D., He, B., Zhao, X., 2020. Impact of temporal rainfall patterns on flash floods in Hue City, Vietnam. *Journal of Flood Risk Management* e12668, 1–15.
- Nanía, L.S., León, A.S., García, M.H., 2015. Hydrologic-hydraulic model for simulating dual drainage and flooding in urban areas: Application to a catchment in the metropolitan area of Chicago. *Journal of Hydrologic Engineering* 20, 1–13.
- Pathak, S., Liu, M., Jato-Espino, D., Zevenbergen, C., 2020. Social, economic and environmental assessment of urban sub-catchment flood risks using a multi-criteria approach: A case study in Mumbai City, India. *Journal of Hydrology* 591, 125216.
- Pe'eri, S., Long, B., 2011. LIDAR technology applied in coastal studies and management. *Journal of Coastal Research* 62, 1–5.
- Pernambuco, 2016. Pernambuco tridimensional: mapeamento do território pernambucano. Disponível: <http://www.pe3d.pe.gov.br/> Acesso: 30 mar. 2020
- Recife, 2013. Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente, in: ABF Engenharia Ltda (Org.), *Elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife*. ABF, Recife, pp. 1–333.
- Ribeiro Neto, A., Cirilo, J.A., Dantas, C.E.O., Silva, E.R., 2015. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 394–403.
- Romali, N.S., Yusop, Z., Ismail, A.Z., 2018. Application of HEC-RAS and Arc GIS for floodplain mapping in Segamat town, Malaysia. *International Journal of Geomate* 15, 125–131.
- Sá, P.E.F., Batista, T.L., Lacerda, P.R.T., 2016. Análise da influência da reforma do canal do rio Granjeiro nas características de seu escoamento. XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Aracaju, SE, Brasil.
- Santos, H.G., Júnior, W.C., Dart, R.O., Áglio, M.L.D., Sousa, J.S., Pares, J.G., Fontana, A., Martins, A.L.S., Oliveira, A.P., 2011. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada, escala 1:5.000.000. Embrapa Solos. Disponível: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/920267/o-novo-mapa-de-solos-do-brasil-legenda-atualizada> Acesso: 30 mar. 2020.
- Sartori, A., Lombardi Neto, F., Genovez, A.M., 2005. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 10, 5–18.
- Silva, E.C., 2018. Variabilidade espaço-temporal da pluviosidade da região metropolitana de Recife. Tese (Doutorado). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Silva Junior, M.A.B., Silva, S.R., Cabral, J.J.S.P., 2017. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 22, 1-12.
- Silva Junior, M.A.B., Cabral, J.J.S.P., Fonseca Neto, G.C., Silva, P.O., Guerra, C.M.F., Silva, S.R., 2020. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 5, 302-318.
- Silva, V.S.V., Pedrollo, O.C., Castro, N.M.R., Lucchese, L.V., 2013. Estudo de regionalização por transferência de parâmetros do Modelo IPH II na bacia do Rio Ijuí/RS. *Revista de Gestão de Água Da América Latina* 10, 65–75.
- Tucci, C.E.M., Porto, R.L.L., Barros, M.T., 1995. *Drenagem Urbana*, 1ª ed. ABRH, Porto Alegre.
- Vergutz, L.A.A., Pereira, C.E., Schmidt, M.A.R., 2019. Implementation analysis of detention reservoirs in order to minimize the impacts caused by floods. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 24, 1267–1277.

- Welerson, C.C., Silva, B.C., 2019. Análise do impacto do crescimento urbano em uma micro bacia hidrográfica no município de Itajubá/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 1114–1131.
- Zeleňáková, M., Fijko, R., Labant, S., Weiss, E., Markovič, G., Weiss, R., 2019. Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kružlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production* 212, 109–118.