

## **XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

### **ANÁLISE DE PERICULOSIDADE EM ENTRADAS DE BUEIROS. ESTUDO ESPECÍFICO DE UM CASO EM GUARAMIRIM NO PROGRAMA HEC-RAS**

*André Luís Tonin<sup>1</sup> & Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>2</sup>*

**RESUMO** - Bueiros conduzem águas superficiais em bacias urbanas oriundas de chuvas e também possibilitam que cursos de água, naturais ou não, passem por estruturas como rodovias sem permitir que a água danifique o asfalto. Em casos de chuvas extremas, resultando em inundações, bacias urbanas podem conter fluxos de águas intensos e perigosos, podendo arrastar pessoas, carros e outras estruturas, como em um caso que ocorreu em Guaramirim, Santa Catarina, onde casal e filho foram sugados por um bueiro. O trabalho avaliou como que a instalação de diferentes perfis de bueiros afeta o comportamento hidráulico em sua entrada durante um evento de chuva intensa no programa HEC-RAS. Nove configurações de bueiros foram testadas, variando declividades e diâmetros, sendo observadas amplificações de até 0,6 no mapa resultante do produto da profundidade pela velocidade nas proximidades da entrada do bueiro e um aumento de 1,4 m<sup>3</sup>/s na vazão dos bueiros ao comparar os casos de maior e menor impacto. Valores superiores à 0,7 para o produto da profundidade pela velocidade também foram encontrados nas proximidades do bueiro com maior vazão, apontando alta periculosidade para pessoas alheias à sua existência. Diante da necessidade de dimensionamento de bueiros para uma dada vazão de drenagem e do impacto que podem conter em sua região de instalação, o trabalho pondera algumas medidas de segurança como o gradeamento destes.

**ABSTRACT** - Culverts redirect the urban watershed superficial water that results from rainfall and also allow water courses, be it natural or not, to go through structures like highways while not letting the water deal damage to the asphalt. During extreme rain conditions, resulting in flooding, urban watersheds can develop dangerous water flows, being able to drag people, cars and other structures, like has already happened in Guaramirim, Santa Catarina, when two adults and a child were dragged inside a culvert. This paper studied how different types of culverts change the inlet hydraulic behavior during an intense rain event on HEC-RAS. Nine culvert configurations were tested, changing their declivity and diameters, resulting on an up to 0,6 increase in the depth\*velocity map at the culvert proximity and an up to 1,4 m<sup>3</sup>/s increase in culvert discharge while comparing both most and least hydraulic impact extremes. Values above 0,7 were found in the depth\*velocity map near the inlet for the highest discharge culvert, pointing to dangerous circumstances for unaware people nearby. Acknowledging the design necessity for a certain discharge in culverts and the hydraulic impact near the inlets, the paper suggests some safety measurements like gratings.

**Palavras-Chave** – Bueiro, HEC-RAS, Inundação.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Caixa Postal 15029. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. andre.tonin@ufrgs.br.

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Caixa Postal 15029. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. rodrigo.paiva@ufrgs.br.

Bueiros possuem papel importante na drenagem urbana, redirecionando a parcela de chuva que se torna escoamento superficial em bacias urbanas, evitando inundações que poderiam levar a prejuízos materiais e eventuais mortes de habitantes. A água é conduzida para córregos, galerias, rios ou qualquer outra entidade hídrica, natural ou não, capaz de comportar a vazão excedente. Porém, em eventos de chuva intensa, as correntezas geradas em uma bacia urbana na entrada de um bueiro podem gerar riscos aos indivíduos que se encontram nas proximidades destes e alheios à sua existência por baixo de águas turvas.

A National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) recomendou que as municipalidades ‘identifiquem os perigos em condições de enchente’ e fala também no uso de ‘grades e sinalizações para bueiros’ após incidente em que um bombeiro foi sugado em um sistema de drenagem durante uma tentativa de resgate (CDC, 2002).

Este trabalho irá estudar o caso de um acidente que aconteceu em Guaramirim, Santa Catarina, em que casal e filho de colo foram puxados por um bueiro na noite do dia 3 de novembro de 2019 após intensa chuva e sobreviveram (Cláudio Costa, 2019). Como metodologia, o terreno da região, com a área de drenagem deste bueiro, será digitalizado no HEC-RAS (USACE, 2020) e receberá dados da chuva do dia do acidente. Diversas configurações de bueiros, variando declividades e diâmetros, serão aplicadas para observar o comportamento da água a montante. O trabalho não dimensionará a rede de drenagem, mas avaliará os fenômenos que ocorrem na entrada do bueiro.

## OBJETIVOS

- 1) Através do uso do HEC-RAS, criar um modelo de simulação para uma condição histórica de chuva em Guaramirim, Santa Catarina.
- 2) Variar os perfis dos bueiros e checar os diversos efeitos hidráulicos em suas entradas oriundos das mudanças. Nove combinações, com declividades variando em 1%, 5% e 10% e diâmetros variando em 30 mm, 50 mm e 75 mm serão avaliadas.
- 3) Comparar os resultados entre bueiros para detectar padrões entre os fenômenos hidráulicos e os tipos de bueiros empregados, junto com as condições de maior periculosidade.
- 4) Propor medidas conhecidas para aumentar a segurança em entradas de bueiros.
- 5) Este trabalho não pretende modelar com exatidão as inundações (mancha de inundação, velocidades, cota da água) da área do estudo, mas sim os efeitos comparativos entre diferentes bueiros.

## CRIAÇÃO DO MODELO

O município de Guaramirim se encontra no estado de Santa Catarina, Brasil. Localiza-se a uma latitude de 26°28'23" sul e a uma longitude de 49°00'10" oeste, estando em uma altitude de 30 metros. O bueiro do acidente se encontra instalado na base de um muro, rebaixado da estrada em uma vala na rua Anélio Nicoceli, latitude de 26°30'20,95" sul e longitude de 49°00'40,5" oeste (figura 1).

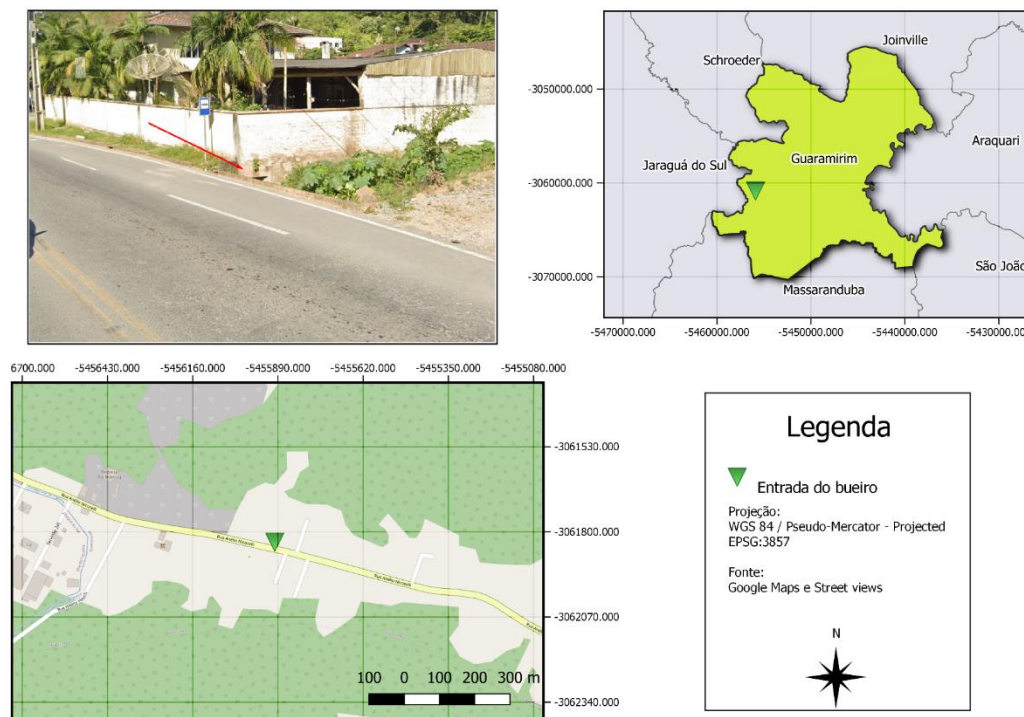


Figura 1 – Localização do bueiro – Imagens do Google Street View e Maps

O software HEC-RAS possui a capacidade de fazer simulações em 1D e 2D, se valendo de informações inseridas pelo usuário para tal. Em simulações 2D, aplicadas neste trabalho, o programa assimila um modelo digital de elevação (MDE) juntamente com a geometria para computação introduzidos em suas ferramentas computacionais para prever o comportamento hidráulico desejado.

Embora prioritariamente usado para analisar o comportamento de rios e as diversas estruturas hidráulicas para manutenção de recursos hídricos (vertedores, soleiras, diques, barragens, reservatórios, entre outros), o HEC-RAS tem a capacidade de simular chuvas, evaporação, infiltração, junto com a edição fácil de terrenos, resultando na possibilidade da criação de um modelo para os fins deste trabalho. Possuindo um arsenal de equações para criar as simulações, a opção mais refinada é a utilização da equação completa do momento (USACE, 2020):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -g\nabla H + \frac{1}{h}\nabla(vh\nabla V) - c_f V + fk \times V + \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (1)$$

$V = (\mu, \nu, 0)^T$  é o vetor de velocidade,  $\nu$  é o tensor de viscosidade turbulenta,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  é o operador diferencial,  $k = (0, 0, 1)^T$  é o vetor na direção vertical,  $\tau_s = (\tau_{s,x}, \tau_{s,y}, 0)^T$  é o stress superficial do vento e  $c_f = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} V$  é a fricção de fundo pela fórmula de Manning.

O modelo digital de elevação foi obtido no site do governo de Santa Catarina (SIGSC, 2010) com resolução de 1 metro. O arquivo escolhido foi um MDT (modelo digital do terreno) da região de Guaramirim, constituindo uma compensação nos dados do relevo fruto da exclusão de copas de árvores, casas, prédios, entre outras entidades verticais, com finalidade de representar da melhor maneira o solo propriamente dito. A identificação deste MDT é MDT\_SG-22-Z-B-IV-2-NE-B.

Com aproximadamente 0,645 km<sup>2</sup>, a bacia do bueiro (figura 2) foi delimitada manualmente através de pontos visuais no terreno e também com o auxílio de um arquivo vetorial, também obtido no site do governo (SIGSC, 2010), que representa o percurso de drenagem da água de todo o estado de Santa Catarina.

Este trabalho utilizará a série histórica do pluviômetro administrado pela CEMADEN (centro de monitoramento e alerta de desastres naturais) de código 420650402A e nome Jacu-açu. Sua localização se dá pela latitude de 26°32'24" sul e longitude de 49°01'12" oeste.

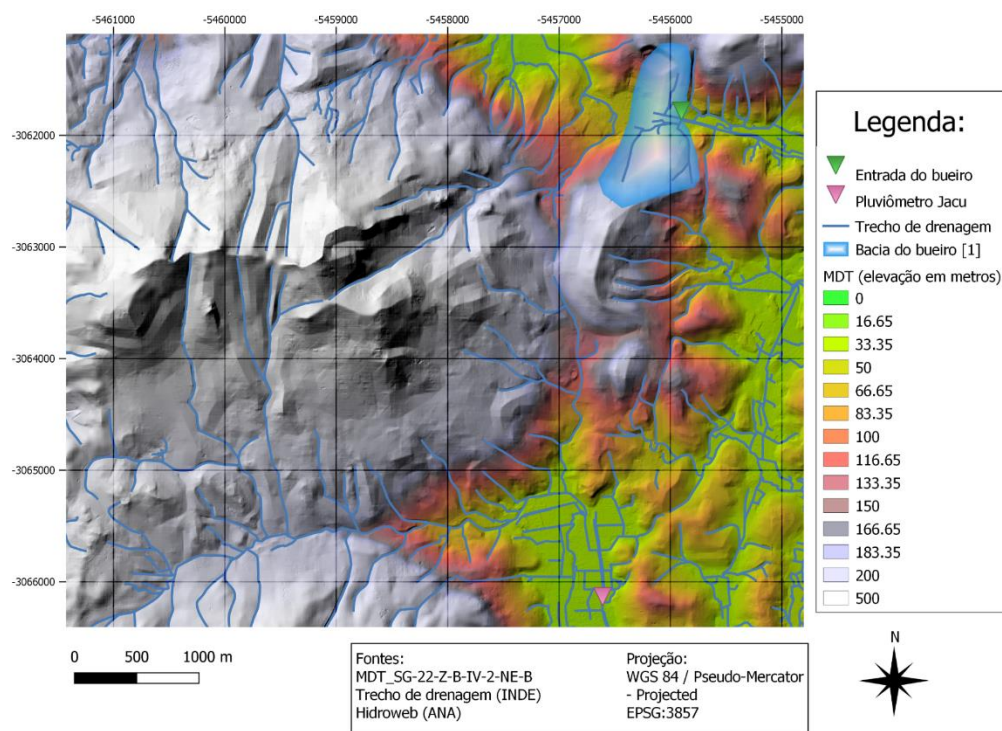


Figura 2 – Relevo – Perfil do MDT com o trecho de drenagem, pluviômetro e bacia do bueiro.



A série temporal de intensidade de chuva registrada para o dia do acidente pelo pluviômetro, que aconteceu em 3 de novembro de 2019, foi formatada para ser compreendida no seguinte gráfico (figura 3):

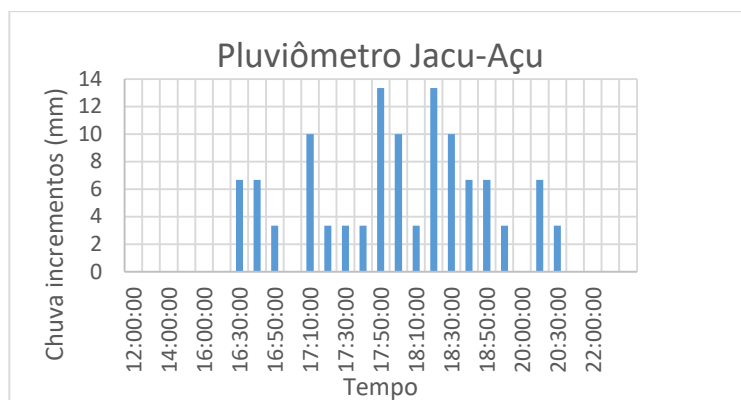


Figura 3 – Incrementos de chuva – Chuva registrada pelo pluviômetro Jacu-Açu em incrementos

O perímetro da bacia do bueiro foi feito sobre o modelo digital de elevação e nele foram criadas células computacionais. Estas células adquirem dados do relevo em suas faces para executar as simulações e foram arbitradas com dimensões 5x5 m para a bacia, porém refinadas para 0,6x0,6 m nas proximidades do bueiro e 0,2x0,2 m imediatamente na entrada do bueiro.

O bueiro foi instalado em um vão, criado na geometria do programa (figura 4), em que uma estrutura transversal genérica de 0,5 metro de largura recebe a tubulação na cota de 39,4 metros. O comprimento do bueiro foi arbitrado em 251,1 metros, valor próximo aos 250 metros estimado pela reportagem. Sua borda foi considerada quadrada, tendo um coeficiente de perda de entrada de 0,5 e número de Manning referente ao concreto, sendo este 0,015 (Netto, 2015).

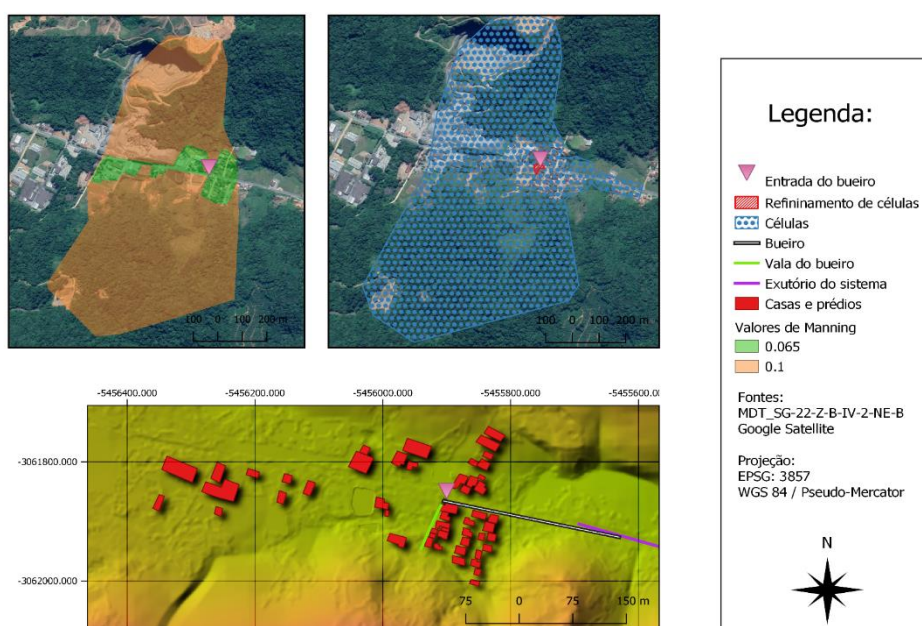


Figura 4 – Geometria – Edições feitas no terreno, Manning e geometria usada para computação.

O tamanho da célula foi escolhido balanceando a necessidade de se obter informação de qualidade no local da célula, tempo de simulação e o número de Courant. O manual do HEC-RAS recomenda manter o número de Courant inferior à 1 para simulações que utilizam a equação do momento completa (USACE, 2020). Intervalos computacionais devem ser menores não somente com as equações de momento, mas também com alta densidade de células para manter o valor de Courant baixo. Uma forma de manter o intervalo computacional adequado para a simulação é utilizar o próprio valor de Courant para balizar o intervalo de tempo durante a execução da simulação, reduzindo ou aumentando o intervalo dinamicamente de acordo com limites estabelecidos pelo usuário. Neste trabalho, o intervalo de tempo foi escolhido como 5 segundos e pode ser dividido pela metade até 4 vezes caso valores de Courant passem de 1.

Algumas edições no próprio relevo foram feitas nas ferramentas do HEC-RAS, como a criação da vala do bueiro e representação das casas. A água deixa o sistema através de uma condição de contorno colocada após a saída da tubulação em um canal artificialmente criado, ambas entidades estão fora da bacia do bueiro. A condição de contorno utiliza o escoamento normal como parâmetro.

Os valores de Manning empregados para a área da simulação foram 0,1 para áreas verdes e florestadas e 0,065 para áreas construídas. Estes valores usaram como referência tabelas encontradas na bibliografia especializada (USGS, 1989) e tentam buscar o equilíbrio entre a quantidade de objetos que obstruem o escoamento (árvores, casas, entre outros) e o material do solo. A impermeabilidade também foi especificada como 70% para áreas verdes e 100% para áreas construídas.

## RESULTADOS

Os dados serão mostrados para cada configuração de bueiro em um primeiro momento, exibindo gráficos de cota de água na entrada do bueiro (figura 4), vazão na tubulação (figura 5) e imagens da inundação com o mapa de profundidade\*velocidade (figura 6 e 7). A região da imagem será a mesma para todos os resultados, assim como os intervalos de tempo em que as informações serão extraídas. Posteriormente, o trabalho irá analisar os resultados de todas as configurações e dissertar, com o uso de comparações, estatística e rasterização, sobre os diversos parâmetros obtidos. O erro de volume foi igual ou inferior a 0,02610% para todas as simulações.

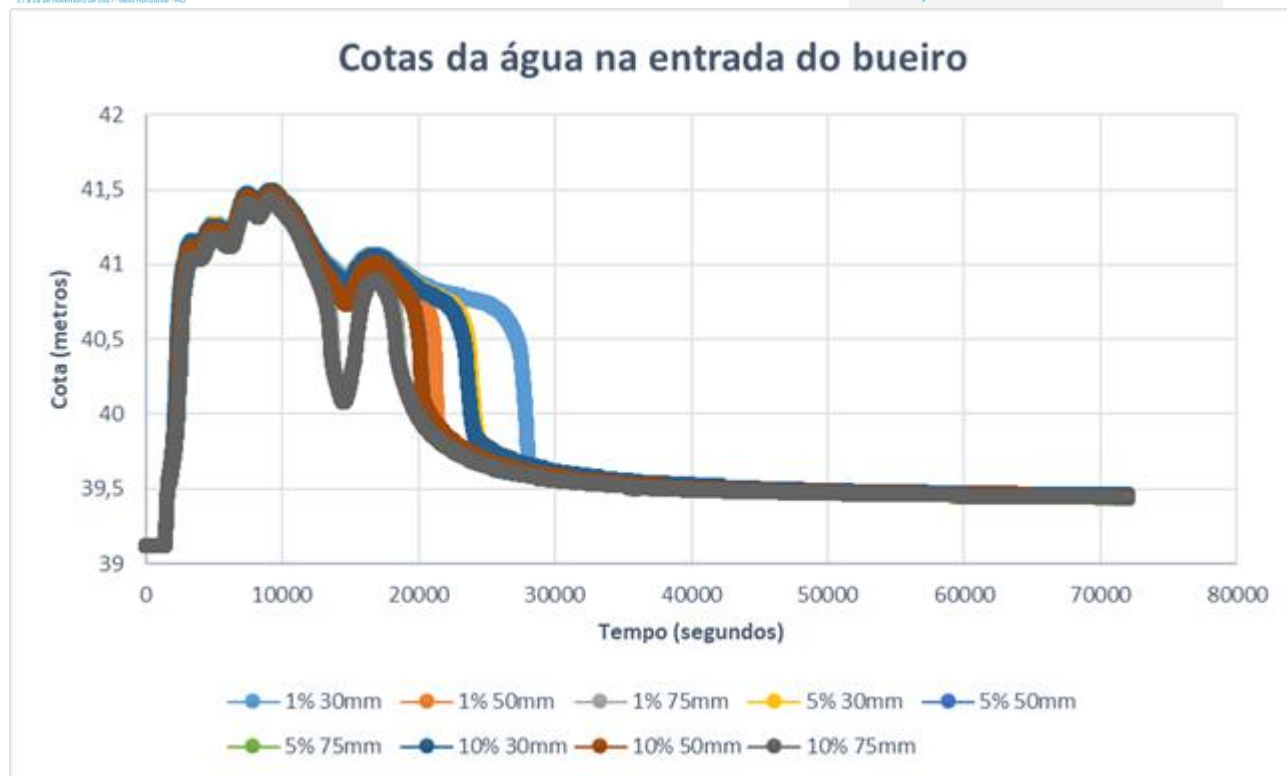


Figura 4 – Cotas – Cotas encontradas na entrada do bueiro.

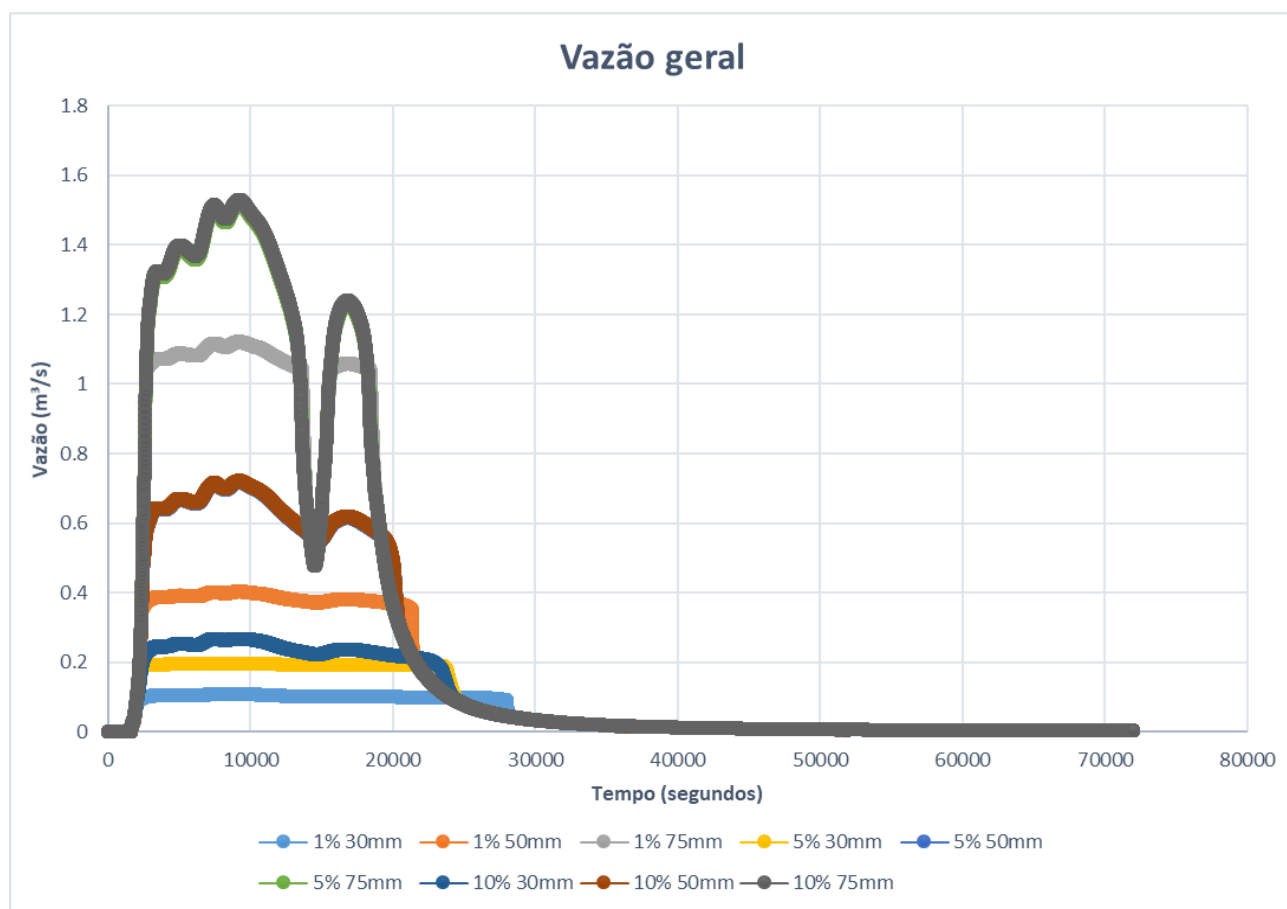


Figura 5 – Vazões – Vazões encontradas na entrada do bueiro.



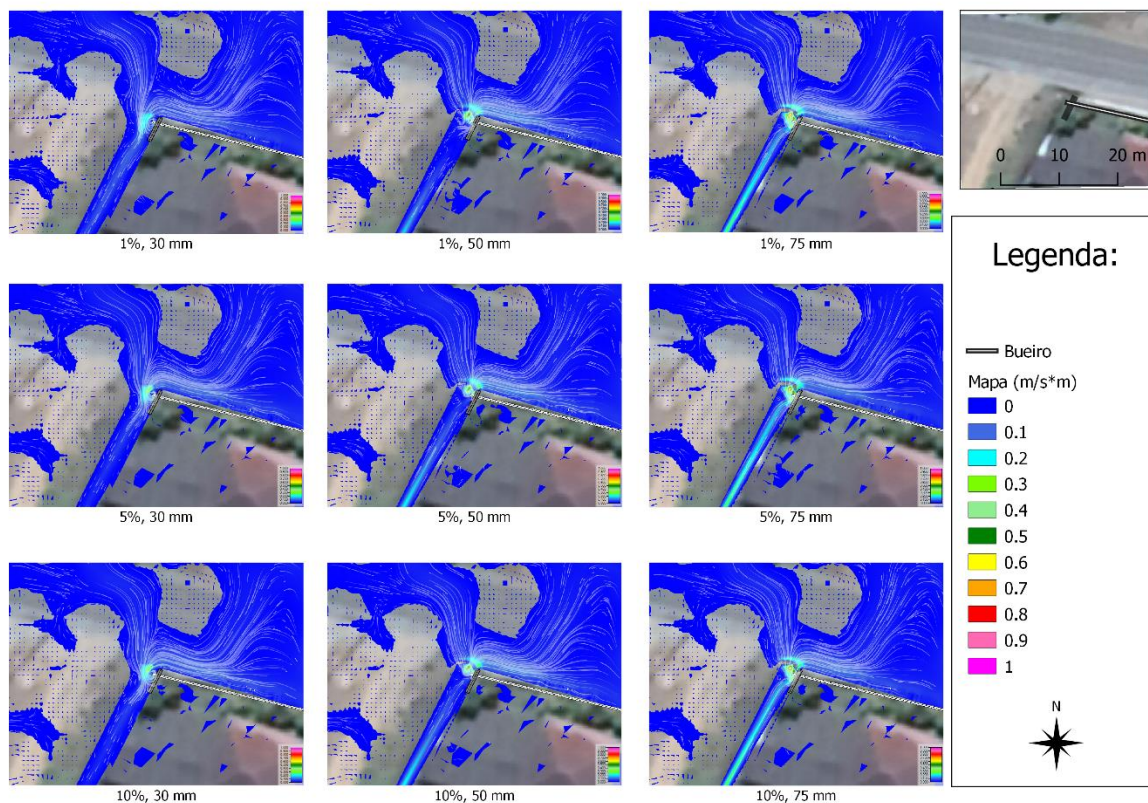


Figura 6 – Mapa 16:40 – Mapas representando o produto da profundidade pela velocidade para cada bueiro durante às 16:40.

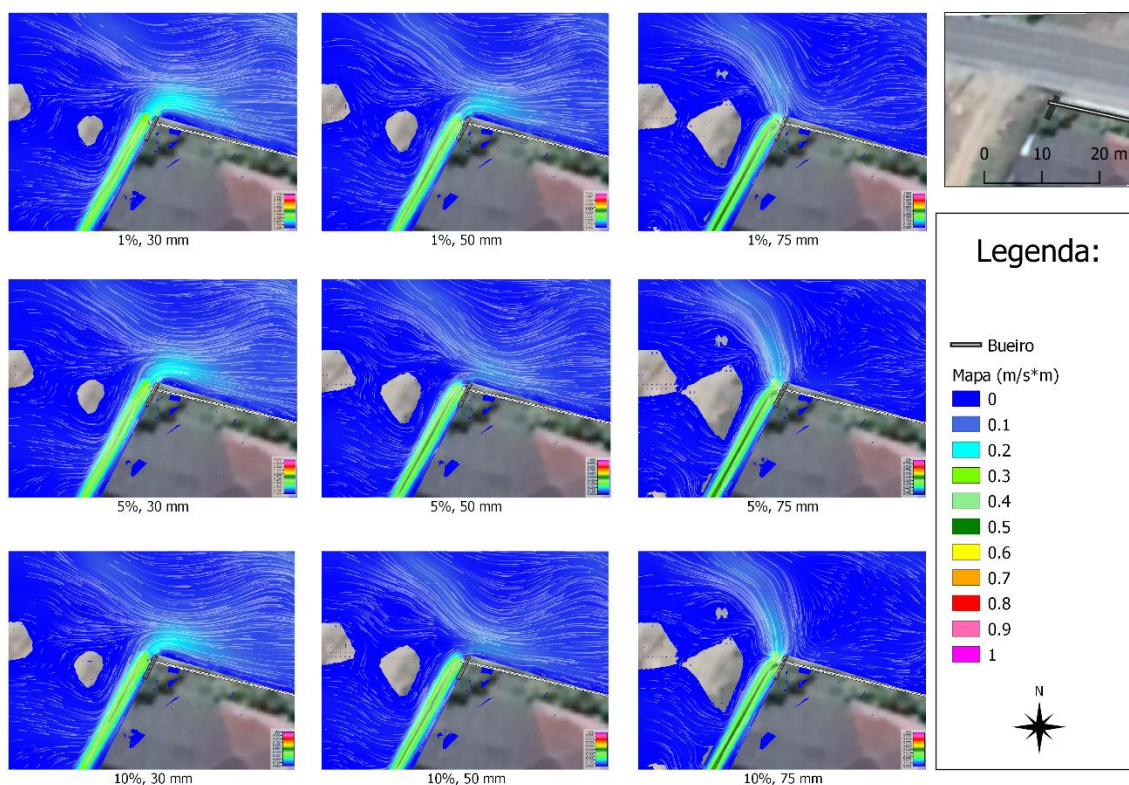


Figura 7 – Mapa 19:30 – Mapas representando o produto da profundidade pela velocidade para cada bueiro durante às 19:30.



O aumento de diâmetro teve um impacto mais significativo nas vazões e cotas de entrada do que a declividade. O bueiro com 1% de declividade e 75 mm de diâmetro possui vazão maior do que os de 5% e 10% com 50 mm de diâmetro. Também é possível perceber que a declividade não representa mudança no comportamento hidráulico quando aumentada de 5% para 10% nas configurações que possuem 50 mm e 75 mm de diâmetro.

Mudando o foco para a análise dos mapas e imagens obtidos, pode-se calcular por rasterização a diferença dos cenários simulados em termos de valores e áreas (figura 8). O trabalho irá computar a amplificação dos efeitos no mapa do produto da profundidade pela velocidade quando avaliamos o cenário com menor influência no comportamento hidráulico (1% e 30 mm) com o cenário de maior (10% e 75 mm). Alguns valores oriundos do mapa do produto da profundidade pela velocidade mostram valores superiores à 0,7 perto da vala do bueiro, capazes de derrubar uma pessoa, como no caso da tubulação de declividade 10% e diâmetro 75 mm.

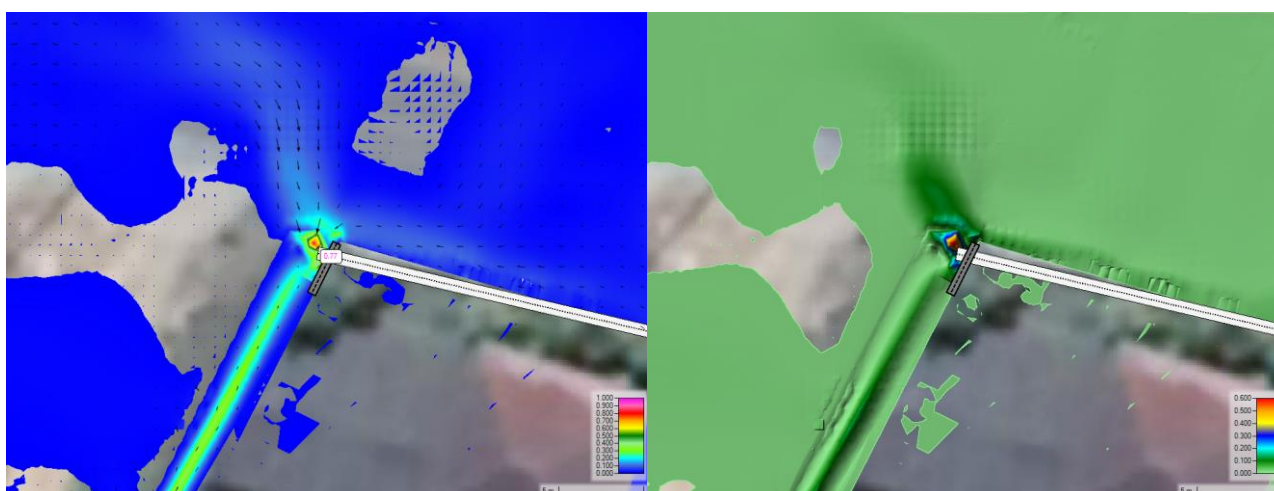


Figura 8 – Momentos críticos – Caso de alta periculosidade na configuração contendo o bueiro 10%, 75mm (esquerda) e a amplificação deste ao se comparar com a configuração de 1%, 30 mm (direita). Ambos aconteceram em 20:18.

## CONCLUSÕES

É possível perceber o aumento nos produtos da profundidade pela velocidade, principalmente nas regiões próximas à entrada do bueiro e nos intervalos mais críticos da chuva. A amplificação chega a 0,6 em alguns momentos quando comparados os bueiros de menor e maior vazões, análogo a um aumento que pode ser considerado 60 cm de profundidade fluindo com velocidade de 1 m/s.

Após extensivas análises gráficas e espaciais dos resultados, entende-se que a declividade da tubulação e diâmetro do bueiro influenciam no comportamento hidráulico da região em que ele está instalado, principalmente nas proximidades de sua entrada.

A utilização de sistemas de drenagens que coletam águas superficiais em uma bacia urbana para redirecioná-la em regiões adequadas é indispensável. O dimensionamento das galerias e tubulações

deve ser suficiente para evitar alagamentos decorrentes de eventos de chuva e suas probabilidades de acontecerem, também expressadas como o tempo de retorno (Tucci, 2015). Porém, como o trabalho aponta, o funcionamento da rede de drenagem gera efeitos hidráulicos em suas proximidades, podendo ser capaz de derrubar e sugar uma pessoa alheia à existência do bueiro. Medidas de segurança como gradeamento das tubulações podem ser tomadas pelas municipalidades, tendo noção que a limpeza periódica deverá ser realizada.

## REFERÊNCIAS

CDC (center for disease control and prevention) (2002). A Fire Fighter Drowns After Attempting to Rescue a Civilian Stranded in Flood Water – Colorado. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/fire/reports/face200102.html>.

CEMADEN (2019). Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>

Claudio Costa (2019). Casal e bebê caem em bueiro e são arrastados por tubulação em Guaramirim. Disponível em: <https://ocp.news/seguranca/casal-e-bebe-caem-em-bueiro-e-sao-arrastados-por-tubulacao-em-guaramirim>.

Netto, J. M. d. A. & Fernández, M. F. (2015). *Manual de hidráulica*. EESC/USP São Carlos- SP, 632 p.

SIGSC (2010). Sistema de Informações Geográficas. Disponível em: <http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp>.

Tucci C. E. M., Porto R. L. L., Barros M. T. d. (2015). *Drenagem urbana*. 428 p.

USACE (United States Army Corps of Engineers), 2020. HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User's Manual Version 6.0 Beta December 2020 CPD-68A

USACE (United States Army Corps of Engineers), 2020. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 6.0 Beta December 2020 CPD-69.

USACE (United States Army Corps of Engineers), 2020. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 6.0 Beta December 2020 CPD-68.

USACE (United States Army Corps of Engineers), 2020. Hydrologic Engineering Center. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

USGS (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains.

WHO (2014). Global Report On Drowning. Disponível em: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/143893/9789241564786\\_eng.pdf;jsessionid=BAEB5A78265785D84BE157A03225813E?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/143893/9789241564786_eng.pdf;jsessionid=BAEB5A78265785D84BE157A03225813E?sequence=1).