



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal De Mato Grosso Do Sul
Programa De Pós-Graduação Em Tecnologias Ambientais



Leonardo de Souza Bruno

**IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DE INUNDAÇÕES EM BACIA
HIDROGRÁFICA URBANA**

Campo Grande, MS

Junho 2021

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Leonardo de Souza Bruno

IMPACTOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DE INUNDAÇÕES EM BACIA
HIDROGRÁFICA URBANA

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Área de concentração: *Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos*.

Orientador: Profa. Dra. Dulce Bicca Buchala Rodrigues

Aprovado em:

Banca Examinadora

Dra. Dulce Bicca Buchala Rodrigues
Presidente

Dr. Paulo Tarso Sanches de Oliveira

UFMS

Dr. José Góes Vasconcelos Neto

Auburn University

Dr. Daniel G. Allasia Picilli

UFMS

Campo Grande, MS

Junho 2021

Dedico este trabalho a Deus, indescritível, inenarrável, imensurável, inimaginável, puro amor, meu guia, meu salvador.

RESUMO

Inundações figuram entre as classes de desastres naturais que mais causam prejuízos as atividades humanas ao redor do mundo. Em conjunto a esse fato, verifica-se que o risco de ocorrência das inundações é crescente, principalmente em áreas urbanas, devido a fatores como as mudanças climáticas, urbanização rápida e ocupação de áreas irregulares e perigosas. Logo, temos a necessidade de se conhecer as áreas que potencialmente podem ser afetadas por esses fenômenos, bem como estipular metodologias para determinar os danos que estes eventos podem causar, financeiros e sociais. Para descobrir áreas sob risco, a modelagem computacional é uma poderosa ferramenta para tal, contudo, simulações em pequenos cursos d'água urbanos representam um desafio, dada a complexidade dos sistemas de drenagem urbanos, que requer dados de alta resolução. Assim, no capítulo 2 desta dissertação, aplicamos os modelos acoplados HEC-HMS e HEC-RAS para determinar áreas de inundação na bacia do córrego Prosa, em Campo Grande no Brasil. Neste, utilizamos dados hidrometeorológicos sub-horários além de modelos de terreno com resolução de 1 metro, junto a dados batimétricos. Ao analisar eventos reais e baseados em chuvas de projeto, os modelos apresentaram métricas na calibração e validação, valores de $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ e $NSE = 0.92$ para o HEC-HMS, e valores de $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ e $NSE = 0.92$ para o HEC-RAS. Os resultados obtidos encorajam a aplicação destes modelos para estudos de inundação em áreas urbanas. Em relação a quantificação de danos econômicos potenciais, no capítulo 3 aplicamos curvas de cota versus prejuízos (geradas para o Brasil), bem como discutimos acerca da dinâmica do processo de inundação na bacia do Prosa. Resultados mostram que inundações com tempo de retorno igual a 100 anos podem causar danos de até 500 mil dólares americanos, no entanto, os dados não possuem uma boa correlação com os elementos reais na bacia do Prosa. Verificamos que as medidas de proteção contra inundações funcionam, mas a solução para as cheias depende de muitos outros fatores. Tomadores de decisão podem utilizar os resultados e metodologia destes capítulos para análise de eventos de cheia em outras áreas urbanas.

Palavras-Chave: Floods, Damages, Modelling, HEC-RAS, HEC-HMS, HEC-FIA

ABSTRACT

Floods are among the classes of natural disasters that cause the most damage values in human activities around the world. Together with this, it appears that the risk of occurrence of floods is growing, especially in urban areas, due to factors such as climate change, rapid urbanization, and occupation of irregular and dangerous areas. Therefore, we need to know the areas that can potentially be affected by flood, as well as delineate methodologies to determine the damage that these events can cause, both financial and social. To discover areas at risk, computational modeling is a powerful tool, however, simulations in small urban watercourses represent a challenge, given the complexity of urban drainage systems, which requires high resolution data. Thus, in chapter 2 of this dissertation, we applied the coupled models HEC-HMS and HEC-RAS to determine flood areas in the Prosa stream basin, in Campo Grande, Brazil. In this, we use sub-hourly hydrometeorological data in addition to terrain models with 1 meter resolution, along with bathymetric data. When analyzing actual and design rainfall-based events, metric data models in calibration and validation, values of $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ and $NSE = 0.92$ for HEC-HMS, and values of $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ and $NSE = 0.92$ for the HEC-RAS. The results encourage the application of these models to flood studies in urban areas. Regarding the quantification of potential economic damages, in chapter 3 we apply quota curves versus losses (generated for Brazil), as well as discuss about the dynamics of the flooding process in the Prosa basin. The results show that floods with a return time equal to 100 years can cause damages of up to 500,000 US dollars, however, the data do not have a good correlation with the real elements in the Prosa basin. We've found that flood protection measures work, but the solution to floods depends on many other factors. Decision makers can use the results and methodology of these chapters to analyze flood events in other urban areas.

Keywords: Inundações, Prejuízos, Modelagem, HEC-RAS, HEC-HMS, HEC-FIA

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me deu forças para seguir em frente, por intermédio de toda minha família, em especial minha mãe Edilene, meu irmão Lucas, meu padrasto José e minha avó Nadir, por me apoiarem diretamente em vários momentos da minha jornada acadêmica, além de todo carinho e atenção.

Aos meus orientadores Dra. Dulce B. B. Rodrigues e Dr. Paulo Tarso Sanches de Oliveira, pelo suporte, disponibilidade, aprendizado e confiança, cruciais para execução deste trabalho. Também quero mencionar os membros do Laboratório HeroS por todo companheirismo, e em especial ao Dr. Tiago Souza Matos, que me inspirou e encorajou para a execução deste trabalho, além de todo o suporte com a prospecção de dados fundamentais.

Aos meus grandes amigos em Campo Grande, e principalmente aos colegas de apartamento Luiz Miguel e Michel, minha segunda família, que ficaram pacientemente juntos de mim nos momentos em que mais precisei. Quero destacar também meus colegas da engenharia e da turma de mestrado, a quem sou grato por grandes momentos em que passei em Campo Grande, que levarei a vida toda, em especial o Luiz Oliveira, o Diego e a Thaís.

A CAPES, pelo apoio financeiro, indispensável para minha manutenção em Campo Grande, e a todos os outros que porventura tenha me esquecido de agradecer.

Sumário

| | |
|---|----|
| Lista de Figuras..... | 10 |
| Lista de Tabelas | 13 |
| Lista de Equações | 14 |
| INTRODUÇÃO GERAL | 15 |
| OBJETIVOS | 16 |
| ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 17 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 17 |
| CAPÍTULO 2 | 19 |
| RESUMO..... | 19 |
| ABSTRACT..... | 20 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 21 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 22 |
| 2.1 Área de Estudo | 22 |
| 2.2 Histórico de Inundações na Bacia do Prosa | 24 |
| 2.3 Delineamento do Estudo | 25 |
| 2.4 Dados Utilizados | 26 |
| 2.5 Chuvas Sintéticas | 29 |
| 2.6 Modelagem Hidrológica..... | 31 |
| 2.7 Modelagem Hidráulica..... | 36 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 41 |
| 3.1 Chuva Sintética | 41 |
| 3.2 Modelo Chuva-Vazão | 42 |
| 3.3 Modelo Hidráulico | 45 |
| 4. CONCLUSÕES | 54 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |
| CAPÍTULO 3 | 60 |
| RESUMO..... | 60 |
| ABSTRACT..... | 61 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 62 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 64 |
| 2.1 Área de Estudo | 64 |
| 2.2 Delimitação do Estudo | 66 |
| 2.3 Dados Utilizados | 66 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Avaliação do Histórico de Inundações da Bacia do Prosa | 67 |
| 2.5 Simulação de Danos Econômicos | 68 |
| 2.6 Cenários de Avaliação..... | 74 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 76 |
| 3.1 Caracterização Histórica | 76 |
| 3.2 Análise de medidas estruturais de Controle de Cheias | 79 |
| 3.3 Avaliação de Danos Econômicos | 82 |
| 3.4 Relações de Interferência na Bacia do Prosa | 85 |
| 4. CONCLUSÃO | 86 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS | 87 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Mapa de localização e situação da bacia hidrográfica do Prosa. Elaborado pelos autores. | 23 |
| Figura 2 - Locais de interesse na modelagem da bacia do córrego Prosa. Elaborado pelos autores. | 24 |
| Figura 3 - Via Parque, rotineiramente (à esquerda) e durante evento de inundação (à direita). Imagens de Joabe Roberto (2020) e G1 MS (2016)..... | 25 |
| Figura 4 - Fluxograma de trabalho para o mapeamento de áreas inundáveis. Elaborado pelos autores. | 26 |
| Figura 5 - Levantamento batimétrico do reservatório de contenção de sedimentos do Córrego Prosa. Setembro de 2019. Dos autores. | 27 |
| Figura 6 - Levantamento de curva chave para a seção exutório, com auxílio de sensor ADCP. Nota-se a presença do sensor de nível e do poste que armazena o pluviômetro. Outubro de 2018. Dos autores. | 28 |
| Figura 7 - Hietogramas de chuvas intensas captados pelo pluviômetro do Prosa. Cada evento “E” possui um identificador numérico associado, com intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores. | 31 |
| Figura 8 - Fluxograma de trabalho no HEC-HMS. Elaborado pelos autores..... | 32 |
| Figura 9 - Elementos do HEC-HMS para a simulação hidrológica do Prosa. Elaborado pelos autores. | 33 |
| Figura 10 - Fluxograma de trabalho dentro do HEC-RAS. Elaborado pelos autores. ... | 37 |
| Figura 11 - Malha de células e mapa de regiões de n de Manning para a localização da Via Parque. Elaborado pelos autores..... | 38 |
| Figura 12 - Hietogramas das distribuições de chuva. Intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores. | 41 |
| Figura 13 - Hietogramas das chuvas sintéticas utilizadas na modelagem hidrológica. Elaborado pelos autores..... | 42 |
| Figura 14 - A e C: Hidrogramas simulados e observados para os eventos E2 e E3, respectivamente; B e C são plotagens de dispersão dos dados de vazão observados e calculados, E2 e E3 respectivamente. Dos autores..... | 44 |
| Figura 15 - Hidrogramas para os eventos de chuva sintéticos. Elaborado pelos autores. | 45 |
| Figura 16 - Comparação dos hidrogramas e índices de correlação, para o evento E4, no HEC-RAS. Elaborado pelo autor..... | 46 |
| Figura 17 - Nível no exutório do canal Pindaré, logo após a escada de dissipação de energia. A figura A é o resultado da simulação de aquecimento, enquanto a figura B é o evento de calibração. Elaborado pelos autores..... | 47 |
| Figura 18 - Comparação de mancha real (esquerda) e computada (direita), para a região da Via Parque. Sem escala. Imagem real reproduzida de Campo Grande News, e computada elaborada pelos autores. | 48 |
| Figura 19 - Manchas de inundação para a região da Via Parque. A é a mancha observada, reconstituída de imagens do evento. B é a simulação para o mesmo evento. C, D, E e F são as simulações de chuva sintética com TR = 5, 10, 50 e 100 anos, respectivamente. Elaborado pelos autores..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 - Perturbações no regime de escoamento dos canais na Via Parque, devido aos degraus existentes. Imagem superior do perfil longitudinal calculado pelo HEC-RAS, e imagem inferior do evento (Youtube). Elaborado pelos autores..... | 50 |
| Figura 21 - Comparação da mancha real (esquerda) e computada (direita), para a Av. Ricardo Brandão. Imagem real reproduzida de Youtube, e computada elaborada pelos autores..... | 51 |
| Figura 22 - Manchas de inundação para a região da Av. Ricardo Brandão. Das letras A, B, C, D e E, temos as áreas relacionadas ao evento de calibração e TR = 5, 10, 50 e 100 anos respectivamente. Blocos em vermelho representam construções afetadas. Elaborado pelos autores..... | 52 |
| Figura 23 - Seção do Parque Ecológico Águas do Prosa, com a simulação da velocidade e linhas de fluxo (figura superior), bem como a imagem real (figura inferior), evidenciando a deterioração do canal nesta área, bem como bancos de areia na lateral direita da imagem. Elaborado pelos autores..... | 53 |
| Figura 24 - Comparação dos hidrogramas de nível para a jusante da cachoeira do Prosa, para os cenários com malha de 3x3m (superior) e 0.5x0.5m (inferior). Elaborado pelos autores..... | 54 |
| Figura 25 - Bacia hidrográfica do córrego Prosa, com situação geográfica. Escala 1:75000. Elaborado pelos autores..... | 64 |
| Figura 26 - Pontos de inundação recorrente na bacia hidrográfica do córrego Prosa. Marcações com os nomes dos logradouros atingidos. Elaborado pelos autores. | 65 |
| Figura 27 - Metodologias para análise socioeconômica adotadas neste estudo. Elaborado pelos autores. | 66 |
| Figura 28 - Vetorização do uso e ocupação do solo das proximidades do canal. Destaque as edificações, em laranja. Elaborado pelos autores..... | 69 |
| Figura 29 - Classificação das edificações, utilizada neste modelo. Elaborado pelos autores..... | 70 |
| Figura 30 - Curvas que relacionam o nível de água com o total da edificação atingida (de 0 até 1). Adaptado de: HUIZINGA; DE MOEL e SZEWCZYK (2017)..... | 72 |
| Figura 31 - Curvas da Fator de Dano para Conteúdos. Adaptado de Nascimento et. al. (2007) | 74 |
| Figura 32 - Urbanização das margens do córrego Sóter. Imagem de satélite de 2002 (a esquerda) e 2006 (a direita). Imagens proprietárias do Google..... | 77 |
| Figura 33 - Obras de proteção contra inundações implantadas em Campo Grande, na bacia do Prosa. Temos na figura 1 a construção do piscinão (imagem de 2009 a esquerda e 2013 a direita), 2 a escavação dos lagos de contenção (imagem de 2006 a esquerda e 2013 a direita) e no 3, a edificação das barragens (imagem de 2006 na esquerda e 2013 na direita). Imagens proprietárias do Google. | 78 |
| Figura 34 - Hidrogramas para o evento de TR = 5 anos, localizados antes da confluência do Sóter e Prosa (A) e depois da confluência (B). Elaborado pelos autores. | 80 |
| Figura 35 - Comparação de hidrogramas na região do exutório. Em A, temos a comparação para TR = 5 anos com e sem a barragem extra. Em B, temos a comparação de todas as medidas versus sem nenhuma. Elaborado pelos autores..... | 81 |
| Figura 36 - Exemplo de adaptação das construções nas áreas vulneráveis. Fundações mais altas que o nível da calçada. Dos autores..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 - Vista 3D para as edificações atingidas (segundo o modelo de danos), para a região do exutório (Av. Ricardo Brandão), para TR = 100 anos. Elaborado pelos autores..... | 83 |
| Figura 38 - Curva de danos versus frequência, para o córrego Prosa. Elaborado pelos autores..... | 83 |
| Figura 39 - Conexões de causa e consequência para os diferentes elementos que compõem a bacia do Prosa. Elaborado pelos autores..... | 86 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Reportagens de eventos de inundação na bacia do Córrego Prosa..... | 25 |
| Tabela 2 - Dados de características de inundação e marcas de água, informados por residentes das áreas próximas aos córregos Prosa, Sóter e Pindaré. Os nomes dos residentes foram omitidos. Elaborado pelos autores. | 28 |
| Tabela 3 - Eventos significativos de chuva observados pela estação do exutório, e suas métricas. Elaborado pelos autores. | 31 |
| Tabela 4 - Coeficientes de rugosidade para os trechos de canal do modelo hidrológico. Elaborado pelos autores..... | 35 |
| Tabela 5 - Opções de cálculo utilizadas para este modelo e observações sobre a utilização. “-“significa que não há unidade e/ou observação. Elaborado pelos autores. | 40 |
| Tabela 6 - Projetos padrões da NBR 12721. Elaborado pelos autores..... | 68 |
| Tabela 7 - Fatores de depreciação de acordo com o estado de conservação. Adaptado de AWAD (2017)..... | 71 |
| Tabela 8 - Fatores de área equivalente para todos os projetos da NBR 12721. Elaborado pelos autores. | 71 |
| Tabela 9 - Cenários de inundação simulados, utilizados para a avaliação. Elaborado pelos autores. | 75 |

Lista de Equações

| | |
|--|----|
| Equação 1 - Função IDF..... | 25 |
| Equação 2 – Tempo de Pico Normalizado | 25 |
| Equação 3 – Centróide Normalizado | 25 |
| Equação 4 – Diferença de Pico Normalizada..... | 25 |
| Equação 5 – R^2 | 32 |
| Equação 6 – RMSE..... | 32 |
| Equação 7 – NSE | 32 |
| Equação 8 – Equação da Continuidade | 34 |
| Equação 9 – Equação do Momentum (u)..... | 34 |
| Equação 10 – Equação do Momentum (v)..... | 34 |
| Equação 11 – Condição de Courant | 37 |
| Equação 12 – Grau de ajuste | 38 |
| Equação 13 – Danos as edificações..... | 68 |
| Equação 14 – Danos ao conteúdo das edificações | 71 |

INTRODUÇÃO GERAL

De acordo com o último relatório do CRED & UNDRR (2021), dentre os desastres naturais ocorridos no ano da publicação, as inundações ganham destaque como o fenômeno mais relatado, com 201 dos 389 eventos reportados, correspondendo a um prejuízo econômico estimado de US\$ 51,3 bilhões, afetando até 33.2 milhões de pessoas em todo o mundo. Com relação ao Brasil, o mais recente relatório sobre desastres naturais na América Latina do OCHA (2020), afirma o país como o mais vulnerável aos eventos de inundação dentre os pesquisados, com pelo menos 70 eventos de grandes proporções reportados, afetando direta ou indiretamente, no período de 2000 a 2019, cerca de 70 milhões de habitantes.

Assim, estudos para identificação de áreas sob risco de inundações são cruciais para assegurar a segurança física, econômica e social das comunidades, com atenção especial às regiões urbanas, já que são as mais afetadas HOSSAIN e MENG (2020). Diversas questões contribuem para o agravamento das inundações em áreas urbanas, que incluem limitações de conhecimento da população e tomadores de decisão sobre inundações, alta impermeabilização de solo, construção de edificações dentro de áreas vulneráveis e também falta de parâmetros legais sobre uso e ocupação do solo (NKWUNONWO; WHITWORTH; BAILY, 2020).

Para mapear áreas de risco a inundações existem diversas metodologias, desde as mais simples como a observação empírica, chegando a modelagem computacional, que possui o diferencial de permitir conhecer os cenários de cheias considerando as diversas características físicas dos canais e suas bacias hidrográficas (YALCIN, 2020). Apesar de robusta e oferecer muitos dados, a modelagem de eventos de inundação em áreas urbanas requer especial atenção, dado a alta sensibilidade destes modelos a geometria empregada e a série de dados hidrometeorológicos, que devem ter resolução compatível a escala de estudo.

No Brasil, a falta de um banco de dados de alta resolução e a presença de canais pequenos (como por exemplo córregos e riachos com vazão de base abaixo de 1 m³/s) em diversas cidades, geram obstáculos para modelar eventos de inundação, dificultando avaliar se o ajuste destes modelos nestas áreas é satisfatório. Assim, o **capítulo dois** descreve a aplicação dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS para simular eventos de inundação em uma pequena bacia urbana, na cidade de Campo Grande, Mato

Grosso do Sul. Seu córrego principal, possui vazão de base aproximada de 0.6 m³/s, e nele buscamos avaliar se os programas apresentam boas métricas nesta escala, bem como testar cenários de inundação baseados em chuvas sintéticas com diferentes tempos de retorno e assim gerar mapas de risco as edificações próximas aos canais.

A bacia do Prosa, dentre as existentes na capital de Mato Grosso do Sul, possui um histórico de inundações de mais de 50 anos, de tal modo que diversas medidas de proteção foram realizadas para tentar solucionar ou ao menos mitigar o problema. Contudo, como ressaltado por SCHLÖGL et al. (2021), medidas de proteção (principalmente estruturais) não são a garantia de segurança contra as inundações, e logo temos adotar uma análise mais ampla, multidisciplinar, a fim de entender a raiz do problema.

Uma maneira ampla de entender as inundações é pelo olhar da socio-hidrologia, que busca estudar as relações entre as atividades e desenvolvimento da sociedade, ante os fenômenos hidrológicos (DI BALDASSARRE et al., 2013). Outra metodologia para avaliar como proteger as populações nos períodos de cheia são as análises econômicas (MARTÍNEZ-GOMARIZ et al., 2020), que visam verificar a efetividade das soluções potenciais por uma métrica financeira, principalmente do custo-benefício das alternativas levantadas.

Desta maneira, o **capítulo três** descreve o histórico de inundações da bacia do Prosa, realizando uma análise descritiva da evolução da bacia, com os eventos passados, medidas de proteção executadas e como estes se relacionam, juntamente com a população e o poder público. Também aplicamos os cenários de manchas de inundação modelados no capítulo um, para avaliar os potenciais prejuízos econômicos em relação as edificações existentes nas proximidades do canal, bem como verificar a efetividade das medidas de proteção existentes.

OBJETIVOS

De forma a alcançar repostas as lacunas nos campos de estudo, o presente trabalho objetiva:

Mapear as áreas de inundação de uma pequena bacia hidrográfica urbana brasileira, e analisar as consequências econômicas e relações de causalidade das ações humanas nas áreas afetadas.

Não há uma hipótese principal a ser levada em consideração, mas ao longo dos processos a serem executados, algumas proposições serão levantadas e discutidas. Ainda neste projeto, alguns objetivos secundários devem ser explorados:

- I. Escolher a melhor metodologia para gerar uma chuva de projeto;
- II. Avaliar a eficácia dos programas hidrológicos e hidráulicos em nos fornecer dados consistentes de manchas de inundação;
- III. Levantar curvas cota x prejuízo para a bacia hidrográfica de estudo. *

(*) Infelizmente devido a pandemia de COVID-19, não foi possível aplicar a metodologia adequada para gerar curvas com dados empíricos para a área, inviabilizando a construção destas. Para avaliação de prejuízos econômicos, levaremos em consideração curvas para o Brasil encontradas na literatura.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Seguinte a introdução geral, mais dois capítulos se somarão. O capítulo um tratará da metodologia do mapeamento de áreas de inundação, incluindo a modelagem meteorológica, hidrológica e hidráulica. O capítulo dois por sua vez arguirá sobre o levantamento de consequências econômicas e sociais para as regiões atingidas por inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRED & UNDRR. **2020: The Non-COVID Year in Disasters**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <file:///C:/Users/asadzadeh.ISBK/Desktop/2020_The Non-COVID Year in Disasters .pdf>.

DI BALDASSARRE, G. et al. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 8, p. 3295–3303, 2013.

HOSSAIN, M. K.; MENG, Q. A fine-scale spatial analytics of the assessment and

mapping of buildings and population at different risk levels of urban flood. **Land Use Policy**, v. 99, n. May, p. 104829, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104829>>.

MARTÍNEZ-GOMARIZ, E. et al. Flood depth-damage curves for Spanish urban areas. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

NKWUNONWO, U. C.; WHITWORTH, M.; BAILY, B. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. **Scientific African**, v. 7, p. e00269, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>>.

OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS. Natural Disasters in Latin America and the Caribbean, 2000-2019. **Reliefweb**, n. March, p. 20, 2020. Disponível em: <<https://reliefweb.int/report/world/natural-disasters-latin-america-and-caribbean-2000-2019>>.

SCHLÖGL, M. et al. Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. **Climate Risk Management**, v. 32, n. February, 2021.

YALCIN, E. Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. **Natural Hazards**, v. 101, n. 3, p. 995–1017, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>>.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA APLICADA PARA EVENTOS DE INUNDAÇÃO RÁPIDA EM PEQUENOS CÓRREGOS URBANOS

Bruno, L. S.; Oliveira, P. T. S.; Matos, T. S.; Rodrigues, D. B. B.

Em preparação de submissão para o periódico *Urban Water*.

RESUMO

No estudo de áreas de inundação, a modelagem acoplada hidrológica e hidráulica, tem sido aplicada com êxito ao redor do mundo. No entanto, a maioria dos trabalhos desenvolvidos no Brasil possuem como objeto de estudo canais de médio a grande porte, com dados topográficos e hidrometeorológicos de baixa resolução espacial e temporal. Assim, o objetivo deste estudo é investigar a modelagem acoplada em um canal urbano de pequeno porte utilizando dados de alta resolução para simulação de eventos de inundação. Neste trabalho utilizamos os programas HEC-HMS e HEC-RAS, onde foram usados como dados de entrada informações topográficas, uso e cobertura do solo e dados observados de pluviômetros, sensores de nível de água e vazão, para o período de 2015 até 2018. Para calibração e validação do modelo hidrológico, utilizamos quatro eventos ocorridos durante o período de monitoramento, enquanto no modelo hidráulico escolhemos um evento histórico de inundação. Posteriormente geramos cenários de inundação com chuvas sintéticas representativas para a bacia, com tempos e retorno de 5, 10, 50 e 100 anos. Observamos um bom ajuste na calibração e validação do HEC-HMS, com valores de $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ e $NSE = 0.92$. No HEC-RAS obtivemos valores de $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ e $NSE = 0.92$ para a calibração, e na validação, imagens reais do evento comprovam as extensões de mancha de inundação computadas. Verificamos que chuvas com tempo de retorno abaixo de 5 anos propiciam áreas de inundação em diversas regiões no canal, sendo que em trechos canalizados críticos, a cota e velocidade do fluxo chegam a 5 m e 3 m/s, respectivamente. Nossos resultados indicam que o canal já possui tendência natural para inundações em certos trechos, que se tornaram mais comprometidos em função do uso e cobertura do solo e condições ambientais locais. Concluimos que a modelagem acoplada de alta resolução gerou informações que representam bem as condições locais, mostrando potenciais falhas da drenagem frente a cenários extremos e possibilitando desta forma o planejamento de adequações e medidas de proteção contra cheias.

Palavras-Chave: Inundações, Modelagem Urbana, Canais Pequenos, HEC-RAS, HEC-HMS

ABSTRACT

In the study of flood areas mapping, hydrological-hydraulic modeling has been successfully applied around the world. However, most of the works developed in Brazil have as their object of study medium to large channels, with topographical and hydrometeorological data of coarse spatial and temporal resolution. Thus, the aim of this study is to investigate a coupled modeling in a small urban channel, using high resolution data, in the simulation of flood events in a small urban channel, located in Campo Grande, Mato Grosso do Sul. In this work, we use the HEC-HMS and HEC-RAS programs, where topographic information, land use, land cover, and observed data from rain gauges, water level and flow sensors, for the period from 2015 to 2018 were used as input data. For calibration and validation of the hydrological model, it uses four events that occurred during the monitoring period, while in the hydraulic model we chose a historical event that caused great disturbances. We then generate flood scenarios with representative synthetic rainfall for a basin, with return times of 5, 10, 50 and 100 years. We observed a good fit in the calibration and validation of the HEC-HMS, with values of $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ and $NSE = 0.92$. In HEC-RAS we obtained values of $R^2 = 0.93$, $RMSE = 1.29$ and $NSE = 0.92$ for the calibration, in the validation, real images of the event prove as computed flood spot sources. We found that rains with a recurrence interval of less than 5 years already provide flooding areas in several regions in the channel, and in forced channeled sections, the stage and velocity reach 5 m and 3 m / s. Our results indicate that the channel already has a natural tendency towards flooding in certain stretches, which become more compromised because of land use and coverage and local conditions. We conclude that the high-resolution coupled modeling generated information that represents local conditions as well, showing how potential failures of drainage in extreme scenarios are possible, thus enabling the planning of adaptations and protection measures against floods.

Keywords: Flash Flood, Urban Modelling, Small Channels, HEC-RAS, HEC-HMS

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o risco de inundações no Brasil e no mundo tem crescendo a cada ano, principalmente com problemas relacionados a rápida urbanização das cidades (LIN et al., 2020; SHAO et al., 2020), ocupação de áreas de risco (MORALES; GUIRALDO e CANTOS, 2018) e eventos pluviométricos extremos (ZHOU et al., 2012). Assim, torna-se crucial o mapeamento de áreas que podem ser afetadas pelas inundações, para que tomadores de decisão criem suas rotinas de trabalho, seja de contenção, mitigação ou prevenção de transtornos, assegurando que a população tenha plenas condições para o desenvolvimento de suas atividades econômicas e sociais.

O uso da modelagem hidrológica e hidráulica acoplada como a metodologia mais difundida para o mapeamento de inundações TENG et al. (2017). As aplicações destes modelos são variadas, incluindo sistemas de previsão de cheias em tempo real (ROCHA e PEREIRA, 2021), avaliação econômica de consequências (PATHAK et al., 2020), engenharia de obras, sejam hidráulicas ou não (ELMOUSTAFA; SAAD e FATTOUH, 2020), planejamento de cidades (ZOPE; ELDHO e JOTHIPRAKASH, 2016; DEVI; SRIDHARAN e KUIRY, 2019), além de pesquisas envolvendo processos erosivos e de transporte de sedimentos (ROSAS et al., 2020).

Enquanto normalmente os modelos hidrológicos são executados de maneira célere, com diversas metodologias bem definidas para cada etapa do ciclo da água, os modelos hidráulicos podem ser computacionalmente onerosos, além da precisão ser dependente da resolução de dados empregada. Modelos hidráulicos podem ser classificados de acordo com a dimensionalidade dos cálculos (1D, 2D ou 3D), sendo que GUO; GUAN e YU (2021) indicam os modelos 2D (baseados na equação de águas rasas completa) como a primeira escolha para a simulação do escoamento superficial geral. Os modelos bidimensionais oferecem uma boa vantagem para o mapeamento de áreas de inundação, uma vez que possuem a capacidade de simular a dinâmica de fluxos laterais de uma planície de inundação ligado ao um canal, como nos modelos 1D (MERWADE et al., 2008), e sem a necessidade de grande poder computacional e tempo para simular grandes áreas, como nos modelos 3D (ZHANG et al., 2021).

Sobre estes modelos, existem uma miríade de programas que podem ser utilizados, cabendo ao modelador a escolha de um deles, baseado nas funcionalidades oferecidas. Em estudos executados no Brasil, existem aplicações exitosas do HEC-

HMS/HEC-RAS (CALIXTO; WENDLAND e MELO, 2020), e também com o SWMM e suas derivações comerciais (DOS SANTOS; BARBASSA e VASCONCELOS, 2021). No entanto, existem dificuldade em configurar e validar simulações de inundação em canais urbanos, principalmente em pequenas escalas e em países em desenvolvimento, devido à alta sensibilidade destes modelos a topografia (ZAMBRANO et al., 2020) e as séries de dados de chuva e vazão (RANGARI; UMAMAHESH e PATEL, 2021), geralmente encontrados em banco de dados abertos de nível regional ou global.

No Brasil por exemplo, poucas localidades possuem banco de dados topográficos de alta resolução disponíveis, de modo que em modelos hidrodinâmicos, são utilizadas combinações de levantamentos topográficos locais, com modelos digitais globais (VASCONCELLOS et al., 2021). O mesmo problema é encontrado nas bases de dados hidrológicos (pluviômetros e linígrafos), uma vez que o principal provedor nacional é a agência nacional de águas (ANA), que fornece dados com resolução diária (SPECKHANN et al., 2018; GOMES; VERÇOSA e CIRILO, 2021).

O objetivo deste estudo é investigar a qualidade das simulações e mapeamento de eventos de inundação rápida, com modelagem hidrológica-hidráulica aplicada em uma pequena bacia urbana, localizada no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Para tanto, utilizamos os programas HEC-HMS e HEC-RAS, tendo como dados de entrada modelo digital de terreno (MDT) de 1m de resolução espacial e séries de precipitação e nível sub-horários monitorados durante 2015 a 2018. Neste estudo também investigamos o comportamento da drenagem quando exposta a eventos de precipitação de projeto, com tempos de retorno (TR) de 5, 10, 50 e 100 anos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Córrego Prosa ([Figura 1](#)), localizada dentro do perímetro urbano de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, abrangendo 25 bairros (incluindo o centro), com uma área de contribuição de 31,97 km², e perímetro de 28,63 km. Além do Prosa existem seis outros canais de macrodrenagem, os córregos Sóter, Vendas, Reveillón, Desbarrancado, Joaquim Português e Pindaré. Estes canais correm sob diversas configurações, alternando de

seções abertas em leito natural até canalizações fechadas, com pontes e bueiros modificando o fluxo ao longo do caminho.

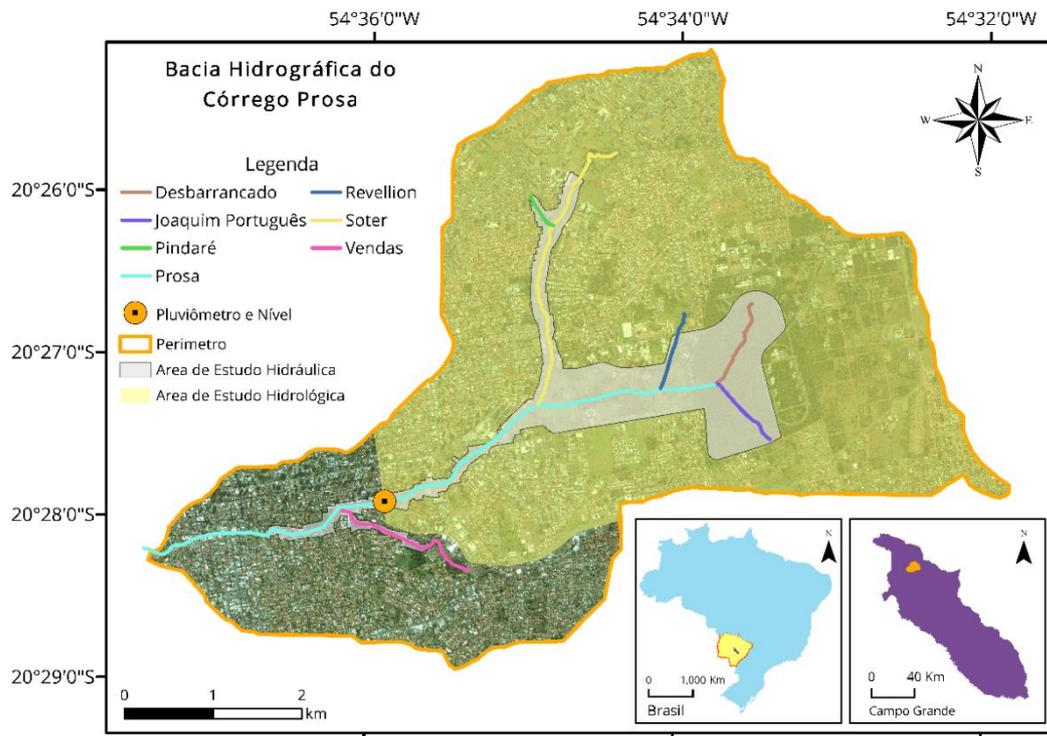


Figura 1 - Mapa de localização e situação da bacia hidrográfica do Prósa. Elaborado pelos autores.

De acordo com dados do pluviômetro 2054014 (gerenciado pela ANA, Agência Nacional de Águas), a pluviosidade média na bacia no período de 1976 a 2015, é de 1445 ± 273 mm, sendo o mês mais chuvoso janeiro (218 ± 84 mm), e o mais seco agosto (34 ± 34 mm). O clima é característico de tropical com estação seca, com a estação chuvosa coincidente com o verão, e a seca com o inverno (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). As temperaturas médias oscilam entre $25,1^\circ\text{C}$ no mês de janeiro, para 20°C em julho, de acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Para o desenvolvimento do estudo utilizamos dados de um pluviômetro e um sensor de nível, com dados sub horários (resolução de 1 min) disponíveis do período de 2015 a 2018. Para que seja possível utilizar os dados dos sensores como condição de contorno nos estudos hidrológicos, consideramos o exutório da bacia na posição do sensor. Para a modelagem hidráulica, baseando-se em manchas históricas registradas pelos veículos de mídia locais, delimitou-se a área de estudo em 80 m de cada lado do

eixo dos canais abertos (comprimento médio de uma quadra), nas áreas urbanizadas, e a totalidade dos parques.

2.2 Histórico de Inundações na Bacia do Prosa

Por mais de uma década, os noticiários de Campo Grande vêm reportando eventos de chuva que causaram algum tipo de transtorno relacionado a drenagem urbana (Tabela 1). A bacia do Prosa é conhecida pelos seus vários pontos de alagamento e inundação, que já custaram mais de 81 milhões de reais aos cofres públicos em obras de contenção e remediação (GAIGHER, 2019). Com relação as inundações, a Avenida Arq. Rubens Gil de Camilo (conhecida popularmente como Via Parque, Figura 3) e as Avenidas Ricardo Brandão e Fernando Correia da Costa concentram o maior número de ocorrências deste desastre (Figura 2). Nestes locais, não apenas a elevação da lâmina de água, mas a velocidade do fluxo também é a responsável pelos transtornos relatados.

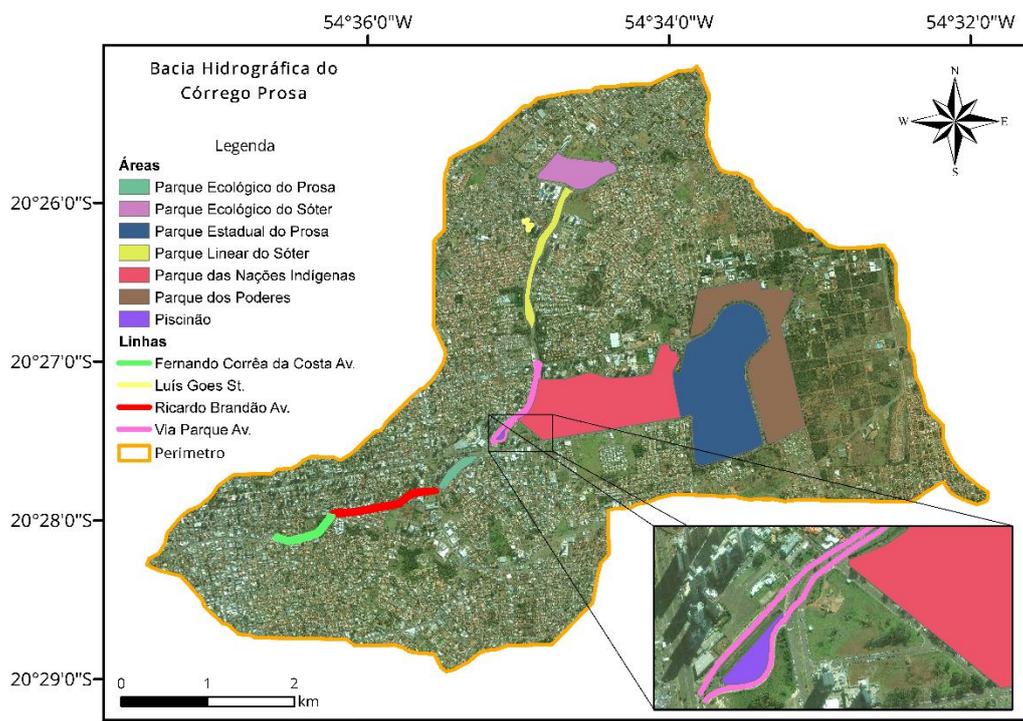


Figura 2 - Locais de interesse na modelagem da bacia do córrego Prosa. Elaborado pelos autores.



Figura 3 - Via Parque, rotineiramente (à esquerda) e durante evento de inundação (à direita). Imagens de Joabe Roberto (2020) e G1 MS (2016).

Tabela 1 - Reportagens de eventos de inundação na bacia do Córrego Prosa.

| Data | Manchete | Fonte |
|-------------|---|---------------------------------|
| 26/01/2012 | <i>“Chuva forte alaga casas no Dalva de Oliveira e assusta moradores; veja vídeo”</i> | (OLIVEIRA, 2012) |
| 31/01/2013 | <i>“Córrego transborda e carro quase é levado pela água na Ricardo Brandão”</i> | (RODRIGUES e VASCONCELOS, 2013) |
| 11/01/2014 | <i>“Córrego Prosa transborda, alaga avenidas e bloqueia trânsito da Capital”</i> | (DIAS; SANTOS e PRADO, 2014) |
| 05/02/2015 | <i>“Córrego transborda durante chuva e ruas alagam em Campo Grande”</i> | (MACIULEVICIUS, 2015) |
| 02/03/2016 | <i>“Chuva na madrugada enche córregos, alaga casas e causa destruição”</i> | (OLIVEIRA, 2016) |
| 03/10/2018 | <i>“Com histórico de inundações, Campo Grande registra problemas nas mesmas regiões há 10 anos”</i> | (GAIGHER, 2019) |
| 26/02/2019 | <i>“Temporal provocou alagamentos em toda a extensão do Córrego Prosa”</i> | (FRIAS, 2019) |

2.3 Delineamento do Estudo

O trabalho foi dividido em três etapas (Figura 4), sendo a primeira parte é referente a calibração e validação numérica da modelagem hidrológica, com parâmetros e malha geométrica derivadas do modelo desenvolvido por MATTOS, T. S. et. al. (2021). Posteriormente temos a calibração e numérica e validação visual do modelo

hidráulico, finalizando com a obtenção de chuvas sintéticas representativas para a área de estudo, com tempos de retorno de 5, 10, 50 e 100 anos, com a geração dos mapas de risco e exposição, para estes eventos.

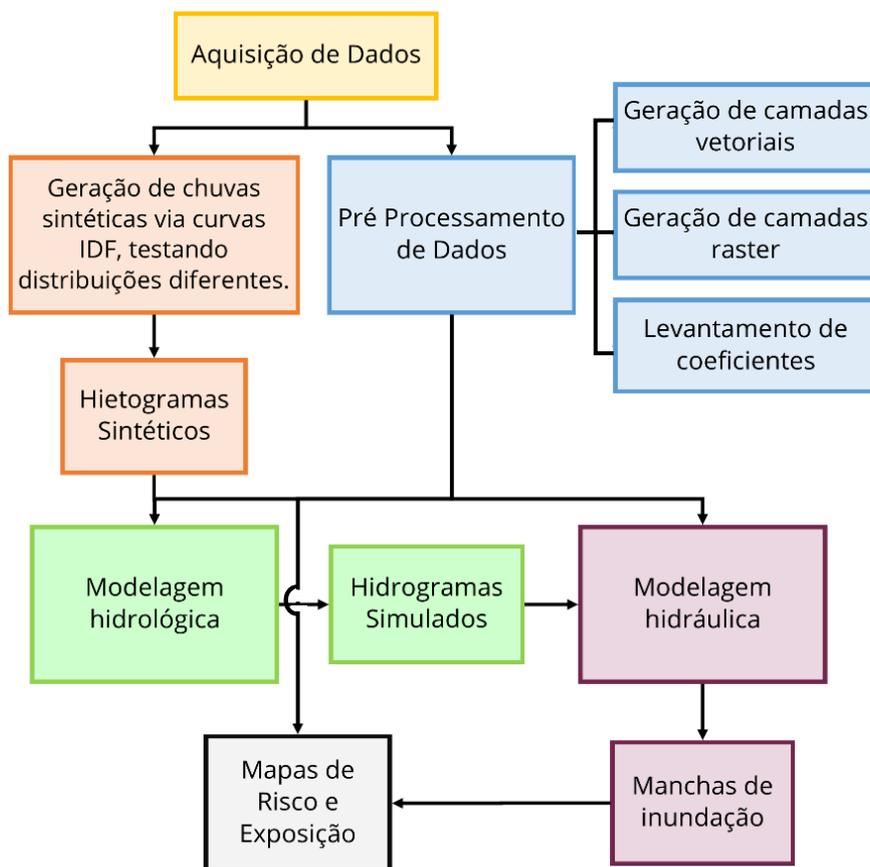


Figura 4 - Fluxograma de trabalho para o mapeamento de áreas inundáveis. Elaborado pelos autores.

2.4 Dados Utilizados

Para executar a modelagem hidrológica-hidráulica são requeridas diversas informações. Para a topografia utilizamos o modelo digital de terreno (MDT) com resolução espacial de 1 m, desenvolvido por levantamento aerofotogramétrico no ano de 2013. Além disso, para o mapeamento e geração de camadas vetoriais, utilizamos duas ortofotos, uma de 2013 (com resolução espacial de 0,1 m) derivada de levantamento aéreo, e outra de 2016 (com resolução espacial de 0,6m) derivada de imageamento do satélite WorldView (PMCG, 2015).

Levantamentos batimétricos foram executados (Figura 5) em quatro reservatórios, além de dezesseis seções transversais nos canais Pindaré, Sóter, Prosa, e

Reveillón, complementando outros dezesseis transectos disponibilizados pela prefeitura (córregos Prosa e Sóter) e mais vinte seções disponibilizadas pela empresa EcoPrime (córregos Prosa e Sóter). As seções transversais dos canais Joaquim Português e Desbarrancado, foram extraídas do MDT. Os estudos de campo para definição da batimetria em canais foram executados por nivelamento topográfico comum (receptor GPS portátil, com nível óptico, régua e fitas) em áreas com águas rasas, e com o Perfilador de Corrente Acústico Doppler (ADCP - comercialmente, RiverSurveyor M9) nas seções com profundidade superior a 0,5 m e nos reservatórios.



Figura 5 - Levantamento batimétrico do reservatório de contenção de sedimentos do Córrego Prosa. Setembro de 2019. Dos autores.

Utilizamos também dados de precipitação e nível de água, com ambos os sensores, fornecendo dados a cada 1 min, no período de 2015 até 2018. Para estabelecer uma curva chave para a seção exutório (Figura 1), realizamos medições com o ADCP durante a recessão de um evento de precipitação intensa (35 mm em 1 h e 15 min), aferindo a vazão continuamente enquanto o nível do canal decrescia, finalizando no limite da capacidade de escaneamento do sensor (nível no canal abaixo de 0,5m).



Figura 6 - Levantamento de curva chave para a seção exutório, com auxílio de sensor ADCP. Nota-se a presença do sensor de nível e do poste que armazena o pluviômetro. Outubro de 2018. Dos autores.

Para conseguir informações locais, sobre nível de água passados e comportamento da onda de inundação próximos as seções de estudo (Tabela 2), aplicamos um questionário com moradores e comerciantes nos imóveis identificados como vulneráveis pelas imagens de eventos de inundação. Foram duas perguntas, incluindo cotas de inundação e duração dos eventos, e obtivemos 6 respostas

Tabela 2 - Dados de características de inundação e marcas de água, informados por residentes das áreas próximas aos córregos Prosa, Sóter e Pindaré. Os nomes dos residentes foram omitidos. Elaborado pelos autores.

| Endereço | Informação |
|----------------|---|
| Ricardo B. 700 | “Quando inunda a água pode chegar até ao galpão, e já aconteceu de alagar mais de meio metro, bem no dia que comecei a trabalhar aqui.” |
| Ricardo B. 646 | “Normalmente não sobe até o escritório, mas quando chega, fica de 15 a 30cm, na parte externa. Dá tempo de levar os carros para a parte mais alta.” |
| Via Parque 255 | “Normalmente a água não chega até aqui, fica alagado mais abaixo, cerca de uma quadra para baixo.” |
| Luís Góis 15 | “A água sobe rápido quando chove forte e chega até o meio fio. Costuma sair todo tipo de insetos e animais perigosos do canal.” |
| Ricardo B. 255 | “De vez em quando, se chover forte a água cobre a rua, e |

| | |
|----------------|--|
| | algumas vezes invadiu a garagem.” |
| Ricardo B. 400 | “Quando chove forte a rua fica toda alagada. Geralmente não chega aqui, por causa da fundação alta do prédio.” |

2.5 Chuvas Sintéticas

Para determinar eventos de precipitação sintéticos, utilizamos distribuições probabilísticas aplicadas a curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) de Campo Grande, disponível no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PMCG, 2015). Esta foi baseada em uma série de dados de precipitação diária, obtidas pelo pluviômetro de numeração 2054014 (ver seção 2.1), em um período de 30 anos.

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} = \frac{1973,15 \cdot T_r^{0.178}}{(t+22)^{0.8577}} \quad (1)$$

Onde: i é a intensidade da precipitação em mm/h, sendo $a(T)$ é uma função baseada no tempo de retorno, T_r em anos; $b(d)$ é uma função baseada no tempo de duração da chuva, t em minutos.

Para escolher uma distribuição de chuva que melhor represente os hietogramas dos eventos de chuvas significativas registrados na bacia (pluviômetro do exutório, dados com resolução de 1 min), aplicamos duas metodologias, referentes a avaliação de parâmetros geométricos (SOLDEVILA; BARTUAL e DOMÉNECH, 2019) e do pico (NA e YOO, 2018), comparando os eventos captados pelo pluviômetro (Figura 7 - Hietogramas de chuvas intensas captados pelo pluviômetro do Prosa. Cada evento “E” possui um identificador numérico associado, com intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores.) com os determinados pelas distribuições. Consideramos como significativos, os 10 eventos de precipitação mais intensos na série de dados utilizada.

Três parâmetros foram determinados para averiguar os hietogramas, incluindo:

Tempo de pico normalizado $T_{pico, n}$: posição do tempo em que ocorreu o ápice da intensidade de chuva, dividido pela duração total do evento.

$$T_{pico, n} = \frac{T_{pico}}{T_{evento}} \quad (2)$$

Centroide normalizado \bar{T}_n : posição do tempo em que se encontra o centroide do hietograma, dividido pela duração total do evento. O centroide de um hietograma com resolução temporal Δt , pode ser calculado pelo somatório dos centroides das barras de intensidade de chuva, como na equação 3, onde d_j é a intensidade de chuva no divisor de tempo j , e I é a intensidade total da precipitação.

$$\bar{T}_n = \frac{\sum_{j=1}^n d_j \cdot (j-0.5) \cdot \frac{\Delta t}{I}}{T_{evento}} \quad (3)$$

Diferença de pico normalizada $\Delta I_{pico, n}$: valor absoluto da diferença entre o pico médio dos eventos e o pico da distribuição, dividido pelo pico médio.

$$\Delta I_{pico, n} = \left| \frac{\bar{I}_{p,obs} - I_{p,cal}}{\bar{I}_{p,obs}} \right| \quad (4)$$

As distribuições escolhidas para o cálculo foram as que possibilitam uma ligação direta com as curvas IDF, incluindo: Retangular (RET), Sifalda (SIF), Triangular (TRI), Duplo Triângulo (DTR), Linear Exponencial (LEX) e Blocos Alternados (BLO). Todas foram calculadas com parâmetros baseados nas médias dos eventos significativos de chuva registrados pelo pluviômetro do exutório, tendo duração de 1,5h e com tempo de retorno de 0.026 ano. O tempo de retorno dos eventos foi obtido isolando a variável na curva IDF. A tabela 2, reúne os dados dos eventos, bem como as métricas calculadas para cada um destes e as médias, utilizadas como parâmetro de teste para as distribuições.

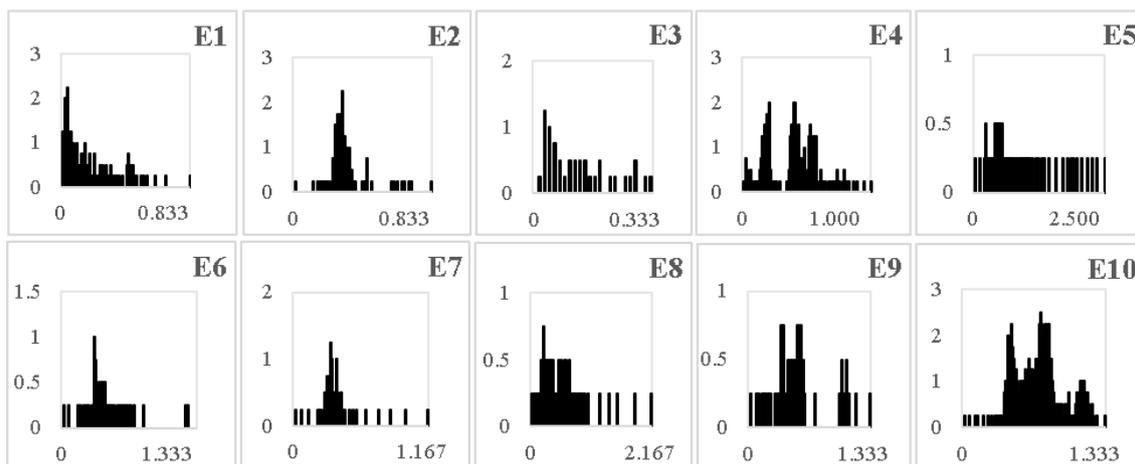


Figura 7 - Hietogramas de chuvas intensas captados pelo pluviômetro do Prosa. Cada evento “E” possui um identificador numérico associado, com intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores.

Tabela 3 - Eventos significativos de chuva observados pela estação do exutório, e suas métricas. Elaborado pelos autores.

| ID | Data | Duração (h) | Total Precipitado (mm) | Pico (mm/h) | Tempo do Pico (h) | Pico Relativo | Centroide (h) | Centroide Relativo |
|---------------|------------|-------------|------------------------|-------------|-------------------|---------------|---------------|--------------------|
| 1 | 4/17/2015 | 1.050 | 24.500 | 2.25 | 0.050 | 0.048 | 0.25833 | 0.24603 |
| 2 | 5/27/2015 | 1.033 | 17.750 | 2.25 | 0.367 | 0.355 | 0.42171 | 0.40811 |
| 3 | 11/9/2015 | 0.383 | 9.000 | 1.25 | 0.033 | 0.087 | 0.15694 | 0.40942 |
| 4 | 12/5/2015 | 1.383 | 42.000 | 2 | 0.283 | 0.205 | 0.55863 | 0.40383 |
| 5 | 12/25/2015 | 3.217 | 20.500 | 0.5 | 0.567 | 0.176 | 1.03110 | 0.32055 |
| 6 | 1/6/2016 | 1.700 | 11.250 | 1 | 0.400 | 0.235 | 0.56222 | 0.33072 |
| 7 | 1/6/2016 | 1.217 | 11.000 | 1.25 | 0.333 | 0.274 | 0.41288 | 0.33926 |
| 8 | 1/8/2016 | 2.183 | 18.500 | 0.75 | 0.233 | 0.107 | 0.53401 | 0.24458 |
| 9 | 2/15/2016 | 1.417 | 16.000 | 0.75 | 0.583 | 0.412 | 0.55052 | 0.38860 |
| 10 | 3/2/2016 | 1.433 | 63.000 | 2.5 | 0.783 | 0.547 | 0.76786 | 0.53571 |
| MÉDIAS | | | | 1.450 | 0.363 | 0.244 | 0.525 | 0.363 |

2.6 Modelagem Hidrológica

Neste trabalho, utilizamos o HEC-HMS para a execução dos cálculos hidrológicos. O *Hydrologic Modelling System* (HMS), é um programa desenvolvido pelos membros do *Hydrologic Engineering Center* (HEC), divisão do *United States Army Corps of Engineers* (USACE). É resultado de 30 anos de desenvolvimento de algoritmos, e segundo SCHARFFENBERG (2016) possui capacidade para realizar a

descrição física de bacias bem como a descrição meteorológica de eventos, permitindo simulações hidrológicas e otimizações (AZAM; KIM e MAENG, 2017), previsões de vazão e testes de cenários (BHADORIYA et al., 2020), análises de incertezas, e estudos envolvendo sedimentos e ou qualidade da água (KAFFAS; HRISSANTHOU e SEVASTAS, 2018).

O HEC-HMS é um modelo concentrado com um programa modular, do tipo que cada etapa do ciclo hidrológico é executada dentro de uma cascata (Figura 8), com uma metodologia selecionada pelo modelador. Especificamente existem quatro etapas a serem modeladas, incluindo os processos de perda, transformação, vazão de base e escoamento de canais. Para este estudo hidrológico, subdividimos a bacia do Prosa em 16 subbacias (uma para cada trecho de canal e respectivas áreas a montante), com o objetivo de maximizar a distribuição do escoamento superficial ao longo dos canais de drenagem. Utilizamos apenas os eventos captados na estação da bacia para as simulações.

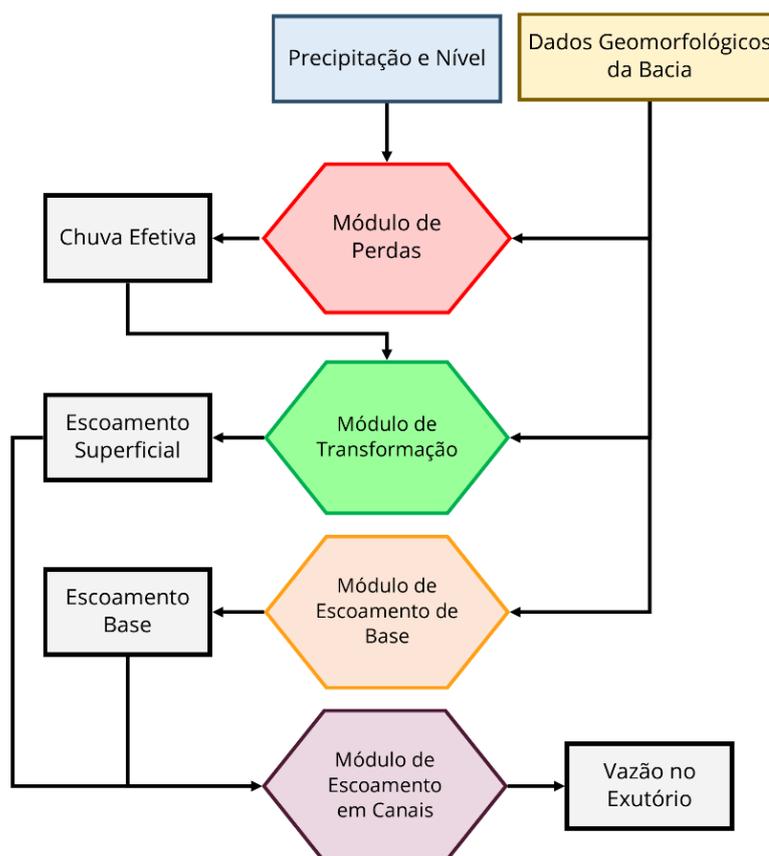


Figura 8 - Fluxograma de trabalho no HEC-HMS. Elaborado pelos autores.

O módulo de perdas foi configurado utilizando a metodologia *Curve Number* do *National Resources Conservation Service* - NRCS (antigo método SCS-CN), onde para cada bacia foi atribuído um valor de CN, de acordo com as características de uso e ocupação do solo bem como condições antecedentes de umidade. Na mesma linha, a metodologia escolhida para o módulo de transformação foi o hidrograma unitário de Clark, sendo que o tempo de concentração e coeficiente de armazenamento das bacias foram determinados utilizando as recomendações TR-55 (NRCS; USDA, 1986) e do modelo Nash (SPENCE, 2007), respectivamente.

Para representar o escoamento base, o método da recessão foi empregado. Este método é baseia-se na análise da curva de recessão do hidrograma padrão, e tem como parâmetro a vazão limiar e o coeficiente de decaimento FELDMAN (2000). Por fim, o módulo de escoamento de canais foi configurado utilizando o método de Muskingum-Cunge, semi-conceitual (baseado em simplificações da onda dinâmica), que tem como parâmetro as seções transversais dos canais de macrodrenagem (1D), bem como a rugosidade da superfície (dada pelo n de Manning).

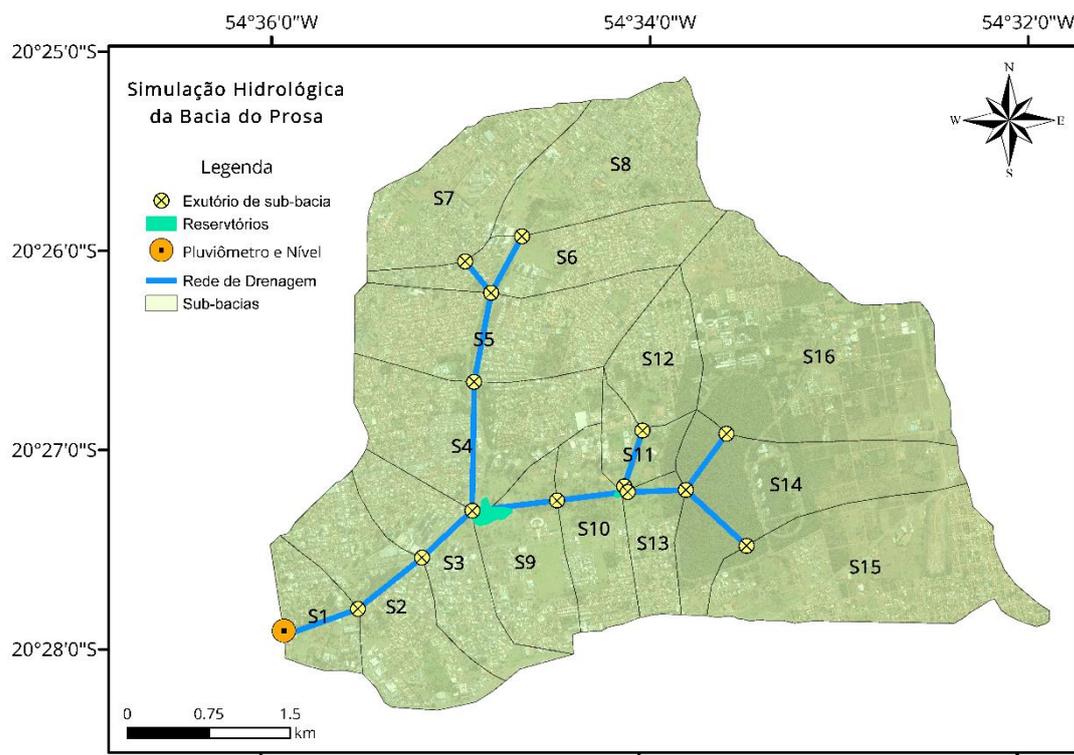


Figura 9 - Elementos do HEC-HMS para a simulação hidrológica do Prosa. Elaborado pelos autores.

Para calibração e validação, utilizamos os eventos de chuva significativos E2, E3, E8 e E9, uma vez que o nível registrado nestes eventos está dentro do conjunto de

dados medidos pelo levantamento da curva chave. A calibração foi realizada ao comparar os valores calculados com o observado (curva chave), onde observou-se diferença de pico, ajustada automaticamente com tentativas de otimização. Nesta abordagem, utilizamos a função objetiva *Percent Error Peak* (PEP), tendo como alvos os valores de *Curve Number* e *Initial Abstraction* (módulo de perdas).

A avaliação do ajuste dos dados, tanto na calibração e validação, foi feita numericamente, utilizando as métricas: coeficiente de determinação (R^2), Root Mean Square Error (RMSE) e Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), calculadas automaticamente pelo HEC-HMS:

O R^2 representa o grau de correlação dos dados observados e calculados, variando de 0 a 1, sendo que quanto maior, melhor. Nas equações, c é o valor calculado pelo modelo, o é o valor observado, e n refere-se ao número do intervalo do dado.

$$R^2 = \frac{n(\sum_{i=1}^n c_i o_i) - (\sum_{i=1}^n c_i) \cdot (\sum_{i=1}^n o_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n c_i^2 - (\sum_{i=1}^n c_i)^2] - [n \sum_{i=1}^n o_i^2 - (\sum_{i=1}^n o_i)^2]}} \quad (5)$$

RMSE representa o erro médio dos dados previstos, em comparação aos observados, sendo que quanto menor, melhor.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - o_i)^2} \quad (6)$$

NSE corresponde a comparação da magnitude da variância residual calculada com a variância do conjunto de dados observados, variando de $-\infty$ a 1, sendo que NSE > 0 indica acurácia preditiva melhor que a média observada. Aqui, \bar{o} é o valor observado médio.

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (7)$$

As tabelas 3 e 4 resumem os coeficientes empregados nas metodologias descritas anteriormente, após a calibração e validação do modelo hidrológico.

Tabela 3 - Coeficientes utilizados no modelo hidrológico operacional, para os métodos hidrológicos. Elaborado pelos autores.

| Hidrológico | | | | | | |
|--------------------|--------|---------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Sub-bacia | Perdas | | Transformação | | Escoamento Base | |
| | C.N. | % Impermeável | Tempo de Concentração (h) | Coefficiente de Armazenamento | Vazão Limite (m ³ /s) | Coefficiente K |
| S1 | 81 | 21.086 | 0.89278 | 1.8437 | 0.02 | 0.85 |
| S2 | 71 | 19.752 | 1.3428 | 1.7359 | 0.02 | 0.85 |
| S3 | 70 | 7.417 | 1.0096 | 1.6599 | 0.02 | 0.85 |
| S4 | 62 | 33.443 | 0.95144 | 2.344 | 0.03 | 0.85 |
| S5 | 72 | 35.126 | 0.28813 | 2.325 | 0.1 | 0.85 |
| S6 | 47 | 22.833 | 0.72277 | 2.3528 | 0.03 | 0.85 |
| S7 | 58 | 33.229 | 0.30685 | 2.285 | 0.1 | 0.85 |
| S8 | 51 | 29.68 | 0.30513 | 2.2645 | 0.1 | 0.85 |
| S9 | 81 | 46.385 | 0.66934 | 0.0911 | 0.01 | 0.85 |
| S10 | 82 | 46.347 | 0.69225 | 0.09159 | 0.01 | 0.85 |
| S11 | 80 | 48.626 | 0.7246 | 0.10687 | 0.01 | 0.85 |
| S12 | 77 | 53.114 | 0.2 | 0.1 | 0 | 0.85 |
| S13 | 74 | 49.814 | 0.22 | 0.1 | 0 | 0.85 |
| S14 | 69 | 54.649 | 0.09 | 0.1 | 0 | 0.85 |
| S15 | 67 | 52.564 | 0.08 | 0.1 | 0 | 0.85 |
| S16 | 72 | 49.825 | 0.09 | 0.1 | 0 | 0.85 |

Tabela 4 - Coeficientes de rugosidade para os trechos de canal do modelo hidrológico. Elaborado pelos autores.

| Hidráulico Simples | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|
| Trecho | Escoamento Canal ("n" de Manning) | | |
| | n Margem Esquerda | n Eixo do Canal | n Margem Direita |
| D1 | 0.1 | 0.048 | 0.1 |
| JP1 | 0.1 | 0.048 | 0.1 |
| P6 | 0.065 | 0.2 | 0.065 |
| R1 | 0.08 | 0.048 | 0.08 |
| P5 | 0.055 | 0.04 | 0.055 |
| P4 | 0.055 | 0.04 | 0.055 |
| ST3 | 0.06 | 0.045 | 0.06 |
| PD1 | 0.055 | 0.04 | 0.054 |
| ST2 | 0.055 | 0.04 | 0.055 |
| ST1 | 0.035 | 0.02 | 0.035 |
| P3 | 0.035 | 0.015 | 0.035 |
| P2 | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| P1 | 0.02 | 0.015 | 0.02 |

2.7 Modelagem Hidráulica

Neste estudo, utilizamos o HEC-RAS (River Analysis System), para as análises hidráulicas. Assim como o HEC-HMS é um programa desenvolvido pelos membros do HEC, divisão do USACE. Foi lançado primeiramente em 1995 (versão 1.0) e em 2020 se encontra na versão 6.0. O RAS pode realizar simulações de fluxo em regime permanente (1D), e não permanente (Figura 10 - 1D, 1D/2D e 2D), além de análises de sedimentos em regime quase não permanente (1D, 2D) e qualidade da água (1D). Para fluxos em regime não permanente, o programa possui esquemas numéricos para resolver a equação de águas rasas (na forma uni e bidimensional), incluindo método de diferenças finitas e volumes finitos, além de simplificações da onda dinâmica, como a equação da onda difusiva.

A equação de águas rasas utilizada, é uma combinação da equação da continuidade e conservação do momentum. Em termos bidimensionais, podemos escrever as equações completas na seguinte forma:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{xx} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - c_f u + f v + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{xx} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - c_f v - f u + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad (10)$$

Onde:

- Eq. 8: Equação da continuidade (conservação de massa) – Esta forma está sob a hipótese da incompressibilidade do fluido. Nela, t representa o tempo, u, v as componentes cartesianas da velocidade, x, y as direções cartesianas, h a altura da coluna de água na fração de plano estudada e q é o termo para a fonte de fluxo (BRUNNER, 2020).
- Eq. 9 e 10: Equações da conservação do momento linear – Esta forma está sob a hipótese de que as dimensões das escalas do plano são muito maiores que a vertical, justificando que as forças verticais se resumem a pressão hidrostática. Se a densidade do fluido for constante e sem a ação de outras forças verticais no fluido, podemos negligenciar os termos de velocidade e

inerciais verticais da equação de Navier-Stokes, obtendo as equações descritas. Nestas, g é a aceleração da gravidade, u, v as componentes cartesianas da velocidade, x, y as direções cartesianas, ν_{xx} e ν_{yy} são os coeficientes de viscosidade turbulenta nas direções x e y , c_f é o termo para o coeficiente de fricção de fundo, τ_s é a tensão de cisalhamento superficial do vento, h é altura de lâmina d'água e f é o parâmetro da força de Coriolis (BRUNNER, 2020).

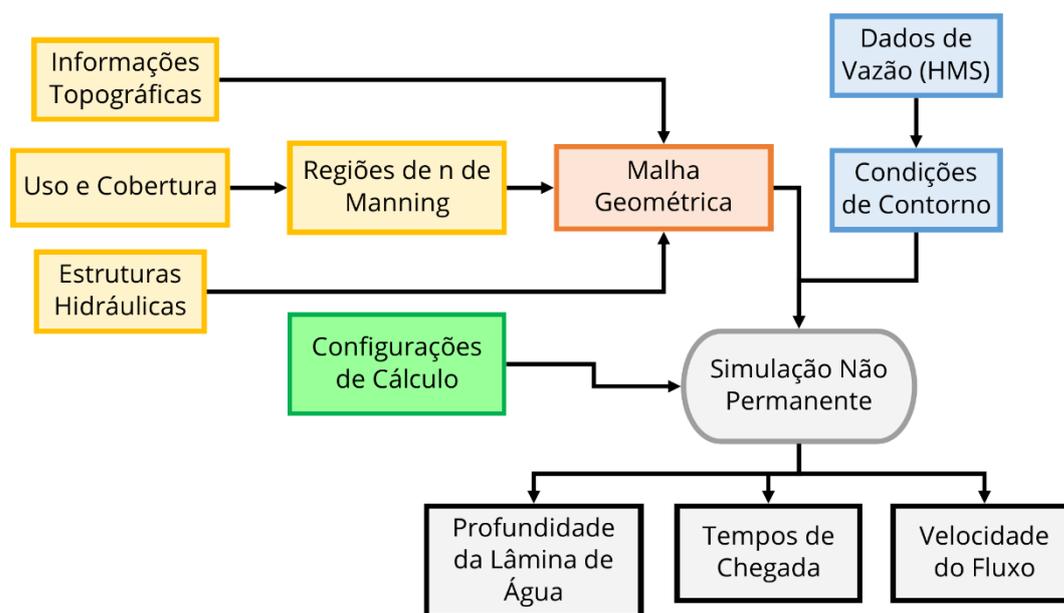


Figura 10 - Fluxograma de trabalho dentro do HEC-RAS. Elaborado pelos autores.

A malha geométrica é o elemento fundamental da modelagem pelo HEC-RAS e foi elaborada em três etapas (Figura 10), incluindo a geração da superfície de escoamento (terreno), do grid de células 2D, e da camada de rugosidade (regiões de “n” de Manning).

O terreno utilizado na modelagem hidráulica é uma modificação do MDT original de Campo Grande, recortado para o limite da área de estudo hidráulica (Figura 1). Apesar de possuir uma resolução espacial de apenas 1m, o modelo original não apresenta em toda a sua extensão alguns elementos de drenagem e de ocupação urbana (como canais, sarjetas e edificações), crucial para gerar manchas de inundação confiáveis e precisas (ARRIGHI e CAMPO, 2019). Logo, baseado em vetores derivados das ortofotos de alta resolução, alimentados com dados de altura de pé direito de edifícios locais, meios-fios e outras estruturas de concreto (incluindo os elementos de

ocupação urbana), além das batimetrias, editamos o terreno via manipulação de dados TIN (*triangulated irregular network*) disponível dentro do pacote ArcGIS.

Construímos a malha de células bidimensionais e regiões de rugosidade de acordo com as ponderações sobre resolução de dados feitas por YALCIN (2020), com o intuito de minimizar erros de continuidade durante o mapeamento, seja por vazamento de água para regiões impossíveis, ou ainda pela heterogeneidade das características da superfície. O *grid* de células deste estudo (Figura 11) foi gerado de maneira adaptativa, quadráticas, aumentando sua escala para células em regiões planas e sem obstáculos, e diminuindo nos locais onde o terreno é irregular, além de ajustes de posição utilizando linhas de quebra, tornando as células paralelas às discontinuidades do terreno. Já a camada de rugosidade para este modelo, divide a área em 23 classes de ocupação do solo, com resolução espacial de 0.15m e cujo *n* de Manning foi atribuído baseado em valores tabelados, ajustados com base nas condições observadas.

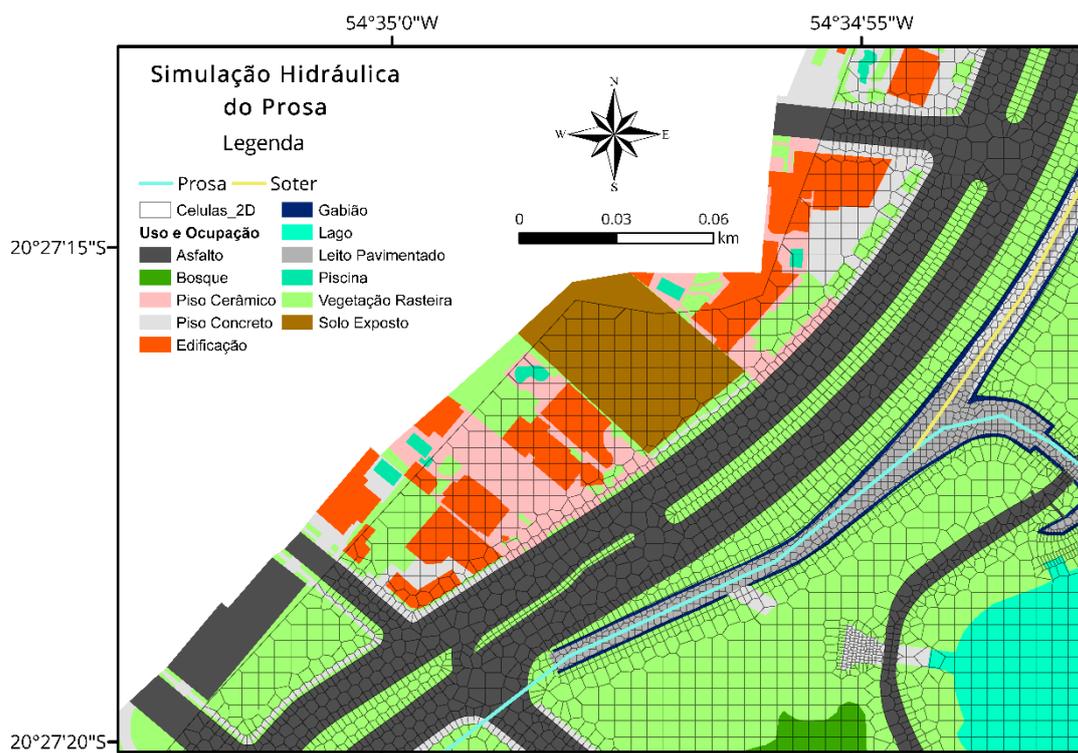


Figura 11 - Malha de células e mapa de regiões de *n* de Manning para a localização da Via Parque. Elaborado pelos autores.

Estruturas hidráulicas como barragens, pontes, bueiros e escadas são muito comuns na bacia do Prosa, e foram implementadas no HEC-RAS com abordagem direta (programa possui uma metodologia específica para resolução) ou de maneira indireta. Neste último caso temos as escadas de dissipação de energia, que foram modeladas

adicionando-as manualmente no terreno, e reduzindo o tamanho das células computacionais para compatibilizar ao tamanho dos degraus.

Os dados de vazão advindos do HEC-HMS foram vinculados ao modelo hidráulico como condição de contorno, no ponto exutório de cada sub-bacia. Os hidrogramas foram descarregados diretamente nas células existentes na posição, assumindo uma declividade da linha de energia paralela ao terreno (profundidade normal). Na jusante geral, a mesma hipótese para o fluxo foi considerada.

Com relação as opções de cálculo, utilizamos equação de águas rasas padrão, sem levar em consideração a força de Coriolis (devido a pequena escala), e desconsiderando os efeitos de vórtices turbulentos (ao demandar estudo complementar para calibração de um coeficiente de turbulência para o canal) e arraste devido aos ventos.

Para aumentar a estabilidade numérica das simulações, o passo de tempo foi controlado pelo programa, pela condição de Courant-Friedrichs-Levy (Eq. 8 – onde é c a celeridade da onda de inundação, Δt o intervalo de tempo do cálculo, e Δx é o comprimento longitudinal da célula). Partindo de um valor inicial de 1 segundo, o número de Courant (Cr) variou de $1 \leq Cr < 0.45$, dada a natureza do estudo (BRUNNER, 2016). Neste critério, sempre que o Cr for superior a 1, o passo de tempo é cortado ao meio, a cada passo até atingir o valor de Cr igual a 1. Caso contrário, o passo de tempo é dobrado, até atingir o valor de 0.45.

$$1 \leq c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 0.45 \quad (11)$$

Outra medida executada para melhorar a estabilidade das simulações (principalmente para os momentos iniciais) são as rodadas de aquecimento. Estas visam reduzir os erros de convergência numérica, ao molhar o *grid* de células uma única vez e estabelecer um fluxo padrão (vazão de base), evitando a formação de frentes de água a cada vez que o modelo sai do estado seco para o molhado, diminuindo o tempo necessário para a modelagem convergir. Após a finalização destas, um arquivo de reinício é gerado (arquivo contendo as informações de nível e vazão em todo o sistema, no último segundo da simulação de aquecimento), utilizado em seguida como condição inicial para as próximas rodadas. Os parâmetros de cálculo estão descritos na [Tabela 5](#).

A calibração da mancha de inundação foi executada manualmente para o evento E4, ajustando os valores de n de Manning (variando em uma margem de ± 0.050 unidades), coeficientes de descarga (variando de $1.66 \leq C_d \leq 1.83$) e coeficientes de perdas das estruturas hidráulicas (margem de variação de ± 0.5 unidades). Estas variações foram determinados de acordo com o elemento de estudo, baseado nos valores tabelados (BRUNNER, 2020) mínimos e máximos para a situação encontrada em campo.

Para verificar o grau de ajuste da calibração utilizamos os dados de nível observados (estação de monitoramento do exutório – Figura 1), e calculamos as já discutidas métricas R^2 , RMSE e NSE. Também calculamos a medida de ajuste da mancha de inundação (F), parâmetro utilizado em locais com falta de dados fluviométricos, que mede o quão coincidente a mancha calculada é em relação a uma observada. Neste caso, o ajuste varia de 0 a 100%, sendo o maior valor, indicador de que a área calculada é igual a observada. A_{int} é a área observada (obs) e calculada (cal) que apresenta inundação (intersecção).

$$F = \frac{A_{int}}{A_{obs} + A_{cal} - A_{int}} \cdot 100\% \quad (12)$$

O evento E4 foi escolhido por ter ocorrido um transbordamento do canal em vários pontos, em um dia útil e durante a tarde, o que permitiu muitas pessoas e veículos de imprensa registrassem o ocorrido. Assim, também temos vídeos e imagens que permitem validar a extensão da lâmina de água.

Tabela 5 - Opções de cálculo utilizadas para este modelo e observações sobre a utilização. “-” significa que não há unidade e/ou observação. Elaborado pelos autores.

| Variável | Valor | Unidade | Observação |
|------------------------------|--------|----------------|--|
| Contagem de Células 2D | 110252 | - | Formato quadrado, variável com a localização do centroide. |
| Área Celular Média | 7.88 | m ² | Área variável. |
| Passo de Tempo | 1 | seg | Pode ser cortado em até 4 vezes (0.25s) ou duplicado em 3 vezes (8s), a depender do número de Courant. |
| Fator de Ponderação Θ | 1 | - | PAPPENBERGER et al. (2005) não encontraram |

| | | | |
|--------------------------------------|---------|-----|---|
| | | | vantagens significativas em adotar valores abaixo de 1. |
| Intervalo do Mapeamento | 5 | min | - |
| Intervalo de Escrita dos Hidrogramas | 5 | min | - |
| Número Máximo de Iterações | 40 | - | - |
| Tolerância no Erro da Altura de Água | 0.003 | m | |
| Solucionador | Pardiso | - | Método direto, utilizando todos os processadores disponíveis. |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Chuva Sintética

Ao aplicar as distribuições de chuva com informações de intensidade para os parâmetros discutidos anteriormente, temos os hietogramas representados na [Figura 12](#) - Hietogramas das distribuições de chuva. Intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores.. Para cada um destes, conseguimos calcular as métricas de pico, centroide e tempo de pico normalizados (equações 2, 3 e 4), permitindo a comparação com os valores médios dos eventos registrados na bacia ([Tabela 5](#)).

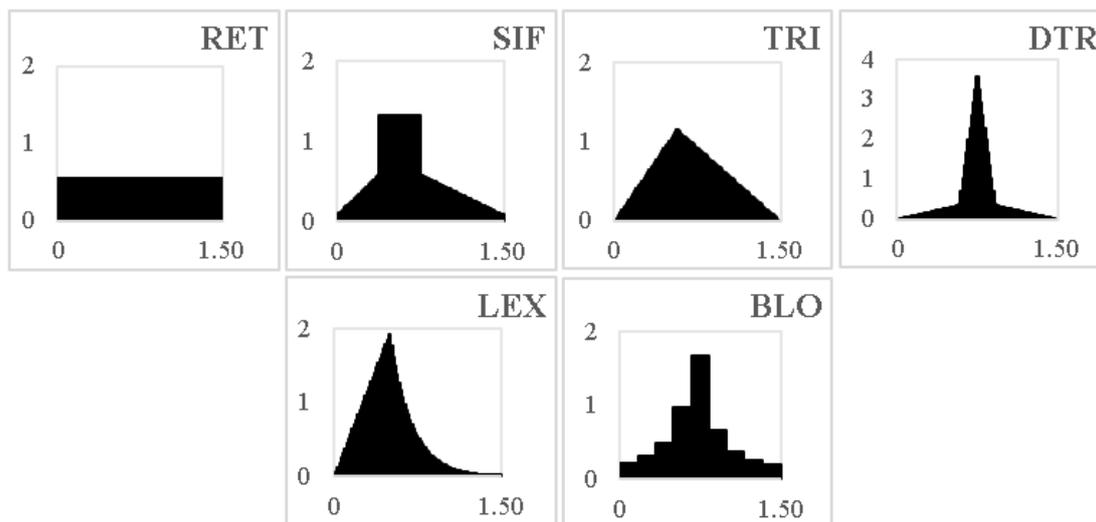


Figura 12 - Hietogramas das distribuições de chuva. Intensidade em mm/h no eixo vertical, e duração em h, no eixo horizontal. Elaborado pelos autores.

Tabela 5 - Diferenças entre as métricas calculadas para as distribuições, em comparação com as médias dos eventos. Elaborado pelos autores.

| Função | Pico Rel. | Centroide Rel. | Tempo P. Rel. | Δ Centroide Rel. | Δ Tempo Pico Rel. | Δ Pico Rel. |
|--------------------|-----------|----------------|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| RETANGULAR | 0.3001 | 0.4944 | 0.5000 | 36.33% | -79.30% | 104.52% |
| SIFALDA | 0.6902 | 0.4502 | 0.3750 | 24.12% | -52.40% | 53.39% |
| TRIANGULAR | 0.6002 | 0.4500 | 0.3750 | 24.08% | -58.61% | 53.39% |
| DUPLO TRIÂNGULO | 1.8560 | 0.4944 | 0.5000 | 36.33% | 28.00% | 104.52% |
| LINEAR EXPONENCIAL | 1.0033 | 0.3230 | 0.3333 | -10.94% | -30.81% | 36.35% |
| BLOCOS ALTERNADOS | 0.8788 | 0.4736 | 0.4889 | 30.57% | -39.39% | 99.98% |

Baseado nesta metodologia, vemos que o modelo linear exponencial possui o melhor desvio em relação as médias dos hietogramas em duas métricas (-10.94% e -36.35% de diferença dos centroides e diferença de pico normalizada, respectivamente), e o segundo melhor desvio na métrica de tempo de pico relativo (-30.81%, sendo em valores absolutos apenas atrás do modelo duplo triângulo). Assim, o modelo linear exponencial possui uma geometria que melhor se assemelha aos eventos significativos registrados na bacia, logo, utilizaremos esta distribuição para gerar os eventos sintéticos com os tempos de retorno (TR) objetificados (Figura 13).

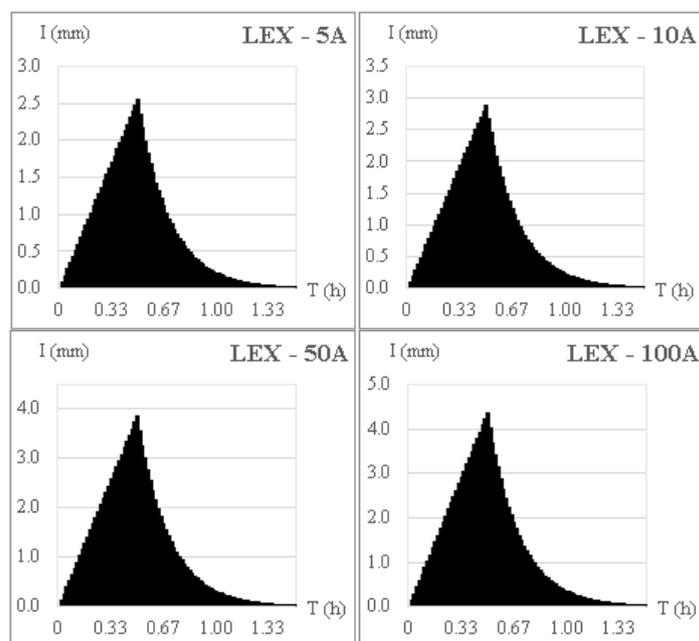


Figura 13 - Hietogramas das chuvas sintéticas utilizadas na modelagem hidrológica. Elaborado pelos autores.

3.2 Modelo Chuva-Vazão

Os eventos utilizados para a calibração do modelo (Fig. 18 - E2, E3) apresentaram coeficiente de correlação (R^2) de 0.93 e 0.89 respectivamente, RMSE de 1.29 e 0.84, enquanto o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) variou de 0.92 e 0.89. Os valores de R^2 próximos de 1 atestam a boa correlação dos dados calculados e observados, enquanto os valores pequenos de RMSE indicam erros preditivos de mesma proporção. Os resultados do NSE próximos de 1 sugerem a boa capacidade preditiva da aplicação. Dentre os eventos selecionados para a validação (E8 e E9), tendo em vista o exposto sobre os valores de referência, vemos a confirmação das capacidades do modelo hidrológico, com E8 e E9 apresentando R^2 de 0.96 e 0.9, NSE de 0.94 e 0.89 e RMSE 1.22 e 1.42 respectivamente.

Outros estudos desta mesma natureza, realizados no Brasil, também utilizaram algumas destas métricas para a calibração e validação de seus modelos hidrológicos. CALIXTO; WENDLAND e MELO (2020), aplicando o HEC-HMS em uma bacia urbana na cidade de São Paulo, encontraram NSE variando de 0.77 a até 0.97, e RMSE na faixa de 0.47 a 0.19. Já GOMES; VERÇOSA e CIRILO (2021), ao simular a hidrologia da bacia do Rio Capibaribe em Pernambuco, encontraram NSE de 0.55 a até 0.74. Também vemos NETO et al. (2020), em seu estudo no Rio Uma em Pernambuco, onde determinaram NSE = 0.64 indo até 0.74 em seus eventos. Com base nestes valores, podemos afirmar que a modelagem executada neste trabalho é de qualidade equiparável ou ainda melhor que as realizadas no país, atestando as capacidades preditivas desta aplicação.

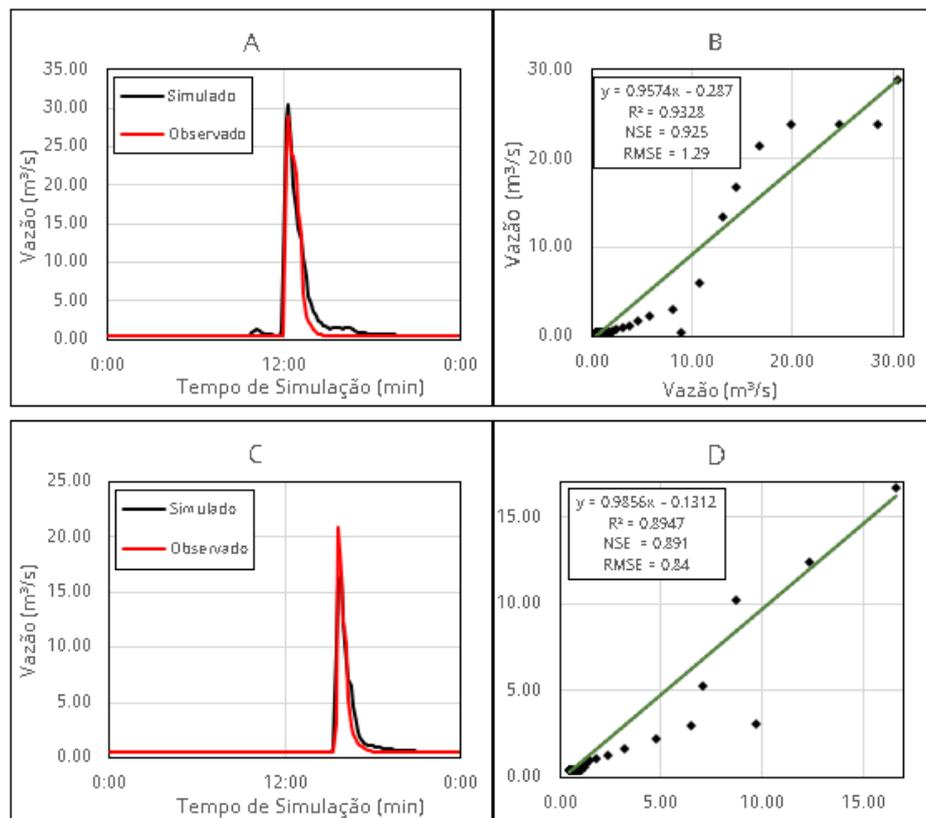


Figura 14 - A e C: Hidrogramas simulados e observados para os eventos E2 e E3, respectivamente; B e D são plotagens de dispersão dos dados de vazão observados e calculados, E2 e E3 respectivamente. Dos autores.

Como o modelo apresentou um bom ajuste na calibração e validação, podemos utilizá-lo para gerar os hidrogramas referentes as chuvas de projeto. Para estes eventos, considerou-se uma condição antecedente de umidade mediana (AMC II) para os valores de CN. Os picos de vazão na seção exutório variam de 161.2, 188.1, 271.1 e 317.5 m³/s para tempos de retorno de 5, 10, 50 e 100 anos respectivamente (Figura 15).

De acordo com o levantamento da curva chave, a capacidade de roteamento da seção exutório (para uma altura de lâmina d'água de 5m) é de 135.49 m³/s, de tal forma que esperamos o transbordamento da calha em todas as chuvas sintéticas produzidas, devido a vazão excedente de 19%, 38.8%, 100.1% e 134.3% nos eventos de TR = 5, 10, 50 e 100 anos respectivamente.

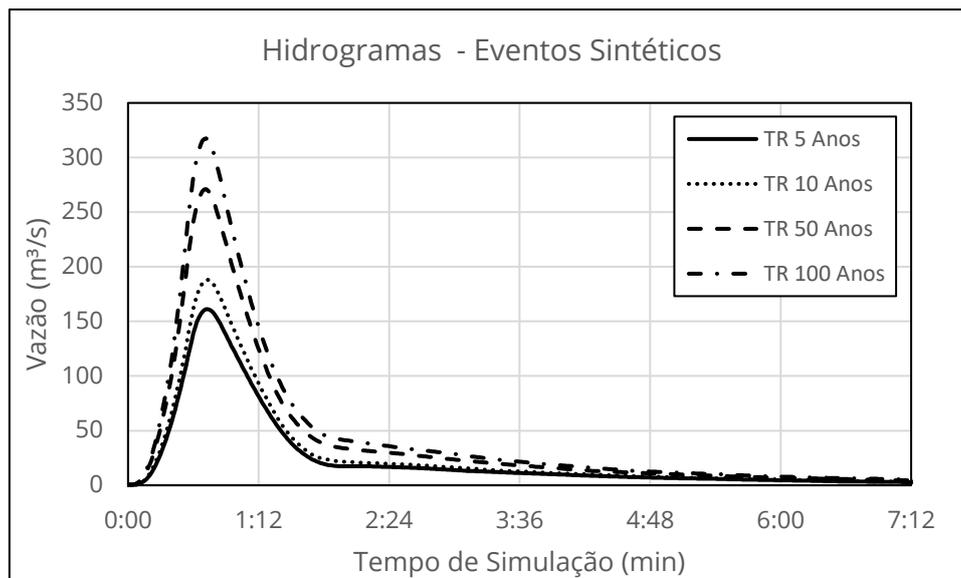


Figura 15 - Hidrogramas para os eventos de chuva sintéticos. Elaborado pelos autores.

3.3 Modelo Hidráulico

Após a calibração manual, comparamos os dados observados e calculados para o evento E4 (Figura 16), e encontramos os coeficientes das métricas de ajuste $R^2 = 0.87$, $RMSE = 0.57$ e $NSE = 0.85$, imputando ao HEC-RAS aceitável verossimilhança com a realidade. Nota-se na comparação de hidrogramas uma diferença de pico de 8.4% entre os valores confrontados, sendo que o período de ascensão da onda de inundação foi mais bem simulado que a recessão. Este comportamento pode estar ligado a características de rugosidade do terreno (valores de n de Manning na planície de inundação, acima do real), armazenamento de volume no terreno superestimado (erros altimétricos do MDT), ou ambos.

Os critérios numéricos padrões utilizados na avaliação da qualidade do modelo (R^2 , $RMSE$ e NSE) não possuem base de comparação em estudos brasileiros, uma vez que há uma grande escassez de dados fluviométricos que permitam os modeladores comparar os dados calculados e observados. Utilizando o critério gráfico F para determinar a coincidência das manchas geradas, nossa aplicação do HEC-RAS gerou uma mancha 68% equivalente a real. Considerando que este índice pode chegar a 100%, o valor desempenhado por este modelo é relativamente satisfatório, mas que tem margem para ser melhorado, com o uso de um terreno ainda mais fiel ao real. Utilizando o mesmo programa, VASCONCELLOS et al. (2021) e GOMES; VERÇOSA e CIRILO

(2021) encontraram valores de F 67.5-77% e 66% respectivamente, indicando que nossa aplicação está com uma performance no patamar dos estudos deste tipo no Brasil.

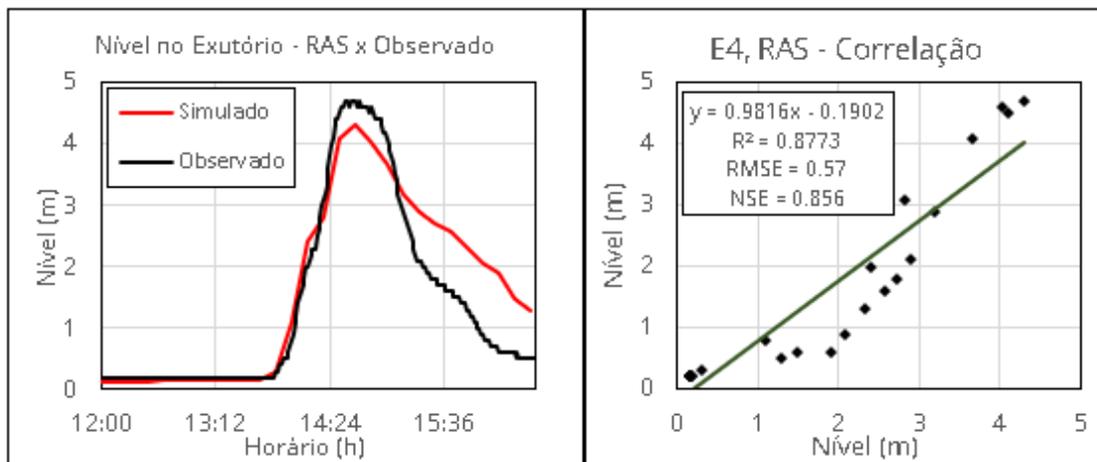


Figura 16 - Comparação dos hidrogramas e índices de correlação, para o evento E4, no HEC-RAS. Elaborado pelo autor.

Baseado nas informações transmitidas pelos moradores (Tabela 2) e com o auxílio de imagens disponibilizadas em redes sociais e veículos midiáticos (Tabela 1), procedemos com uma validação visual para os registros de diversos locais ao longo da bacia. Não apenas restritos a extensão da mancha de inundação, verificamos também o comportamento do fluxo. No entanto, é importante deixar claro que dado a limitação do modelo em não considerar a rede de microdrenagem, lâminas de água geradas pelo extravasamento de bocas de lobo não poderão ser visualizadas.

3.3.1 Estabilidade da Simulação

Como esperado, a presença de muitos elementos hidráulicos distintos (e consequentemente discontinuidades das metodologias de resolução), característica de áreas urbanas, levou a ruídos no resultado das simulações, porém apenas nos momentos iniciais. Para contornar o problema, executamos a simulação de aquecimento (24h de duração), e conseguimos estabilizar ao longo desta, reduzindo as oscilações iniciais (em termos de altura de lâmina d'água), da ordem de 0.5m, para 0.01m. No passo de tempo final desta simulação, geramos o arquivo de reinício, com as alturas de água para todas as células do sistema, e utilizamos esta como condição inicial para todos os outros eventos, beneficiando a estabilidade destes. A Figura 17 ilustra os ruídos encontrados no início da simulação de aquecimento, sua evolução com o avanço do tempo e a visual estabilidade da simulação do evento de calibração E4.

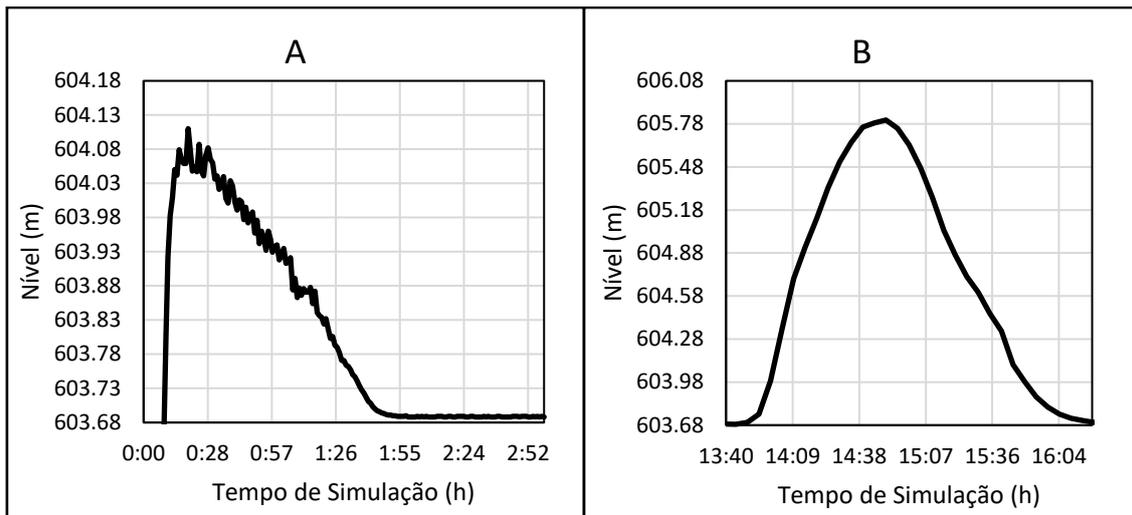


Figura 17 - Nível no exutório do canal Pindaré, logo após a escada de dissipação de energia. A figura A é o resultado da simulação de aquecimento, enquanto a figura B é o evento de calibração. Elaborado pelos autores.

3.3.2 Modelagem da Extensão da Inundação: Via Parque

Na região da Av. Rubens Gil de Camilo, entre a junção do córrego Prosa e Sóter até a saída do piscinão (Figura 2), a mancha de inundação computada para o evento E4 possui uma área de 0.032 km², próximo dos 0.039 km² da mancha observada, perfazendo assim uma diferença percentual de 17.95% (Figura 18). A área afetada valida o depoimento número 3 (Tabela 2), já que a água do canal fica mais restrita ao lado da avenida próximo ao canal, com seção de transbordamento próximo a entrada do trecho fechado que passa sobre a pista.



Figura 18 - Comparação de mancha real (esquerda) e computada (direita), para a região da Via Parque. Sem escala. Imagem real reproduzida de Campo Grande News, e computada elaborada pelos autores.

Analisando as manchas de inundação (Figura 19), notamos que durante o evento de calibração não houve edificações afetadas. Conforme aumentamos o TR da chuva sintética, vemos o aumento da área afetada, com 0.032 km^2 , 0.040 km^2 , 0.051 km^2 e 0.054 km^2 para o evento E4 e TR = 5, 10, 50 e 100 anos respectivamente. Também se nota o progressivo número de construções afetadas, na quadra imediatamente lateral ao canal. A duração da inundação foi levemente impactada pela intensidade da chuva, com presença de água na via lateral ao córrego por 2.00 h no evento de calibração, aumentando para 2.46 h, 2.50 h, 2.56 h e 2.58 h nos outros cenários simulados. Levando em consideração o pior cenário (TR = 100 anos), a inundação demora 0.6 h para atingir as edificações próximas, a partir do tempo de início da chuva sintética.

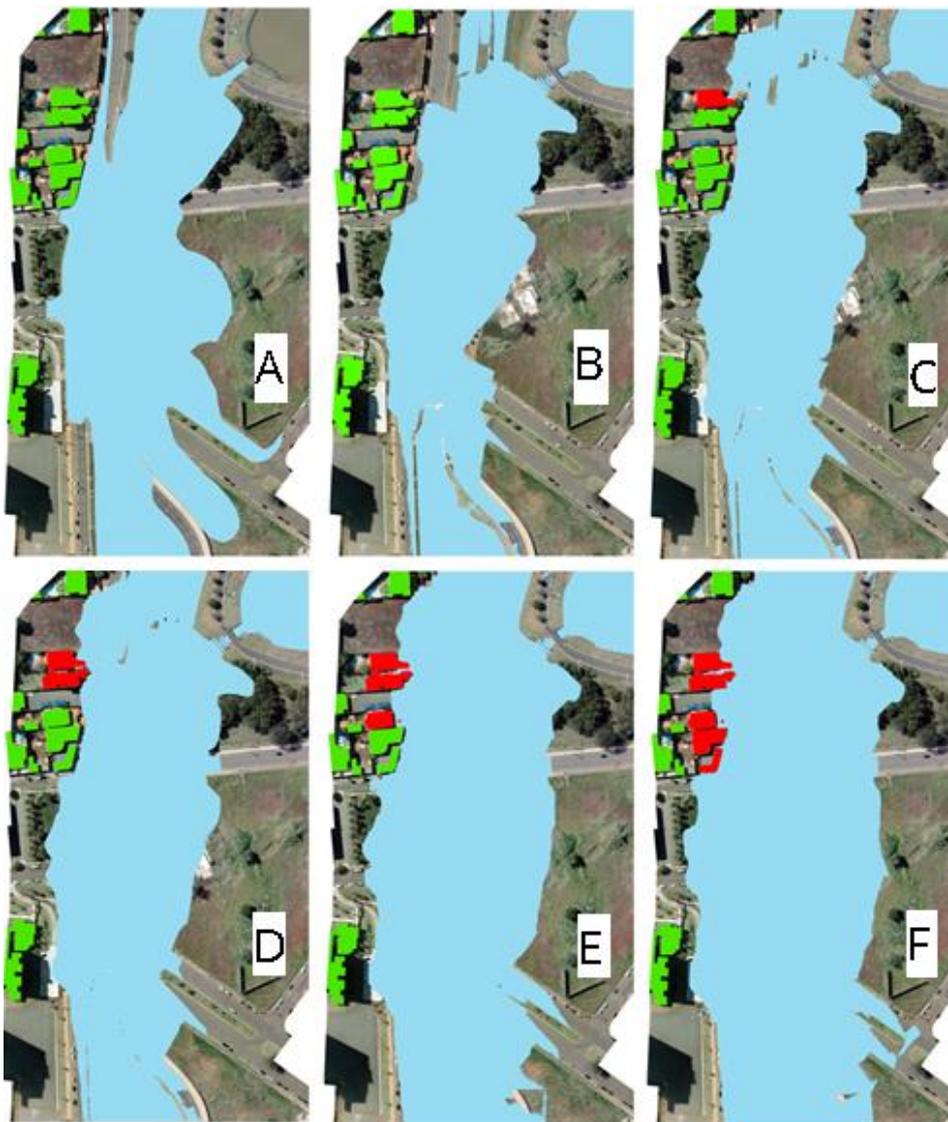


Figura 19 - Manchas de inundação para a região da Via Parque. A é a mancha observada, reconstituída de imagens do evento. B é a simulação para o mesmo evento. C, D, E e F são as simulações de chuva sintética com TR = 5, 10, 50 e 100 anos, respectivamente. Elaborado pelos autores.

Ainda na Via Parque, em seções próximas da junção do canal (Figura 20), o HEC-RAS apresenta uma ondulação nos resultados de perfil longitudinal, em todas as simulações, causados por um degrau no leito do canal. Apesar de não haver informações de nível nesta seção para verificar a amplitude da ondulação, imagens de rede social no dia do evento revelam a presença deste comportamento no canal, validando o resultado computado.

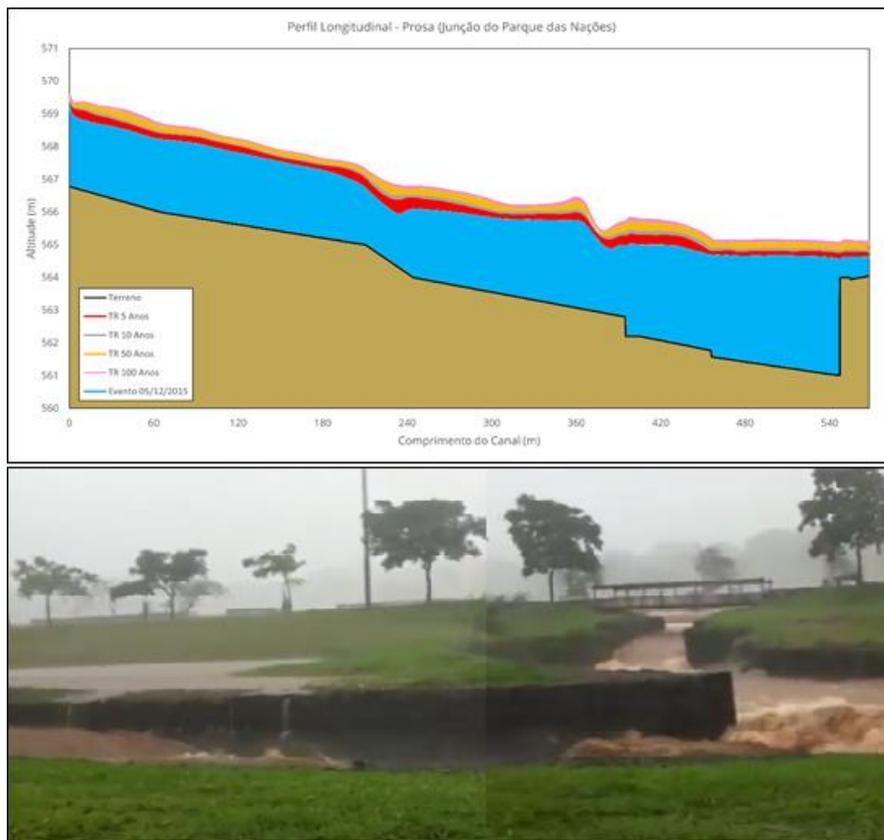


Figura 20 - Perturbações no regime de escoamento dos canais na Via Parque, devido aos degraus existentes. Imagem superior do perfil longitudinal calculado pelo HEC-RAS, e imagem inferior do evento (Youtube). Elaborado pelos autores.

3.3.3 Modelagem da Extensão da Inundação: Av. Ricardo Brandão

Na região da Av. Ricardo Brandão (nas proximidades da seção exutório), o evento de calibração provocou inundação nos imóveis de frente com o córrego Prosa, convergindo com as informações visuais, bem como os depoimentos 1, 2, 5 e 6. Ao analisar o modelo digital de terreno, constatamos que a região é naturalmente propensa a inundações, uma vez que o terreno ondulado característico da região se torna localmente plano, reduzindo a altura do canal construído, principalmente na margem esquerda (no sentido do fluxo), onde se localizam os imóveis atingidos (Figura 21).



Figura 21 - Comparação da mancha real (esquerda) e computada (direita), para a Av. Ricardo Brandão. Imagem real reproduzida de Youtube, e computada elaborada pelos autores.

A mancha de inundação (Figura 22) para esta área possui 0.008 km² para o evento de 05/12/2015 (E4 - calibração), seguido nos eventos sintéticos em 0.010 km², 0.014 km², 0.017 km² e 0.019 km², para os tempos de recorrência crescentes. Do evento E4 para o TR = 100 anos, temos um aumento de aproximadamente 90% da área inundada. Em relação as alturas de água, considerando o ponto médio da avenida ao lado do sensor de nível, temos submersão de 0.43 m, 0.70 m, 0.85 m, 1.20 m e 1.29 m, para os mesmos eventos. Neste parâmetro, notamos o expressivo aumento de 200% entre os eventos E4 e TR = 100 anos.

A duração da inundação nesta região (sendo o ponto de teste na avenida, ao lado do sensor de nível) foi alterada com a intensidade da chuva, partindo de 0.66 h no evento de calibração, subindo para 1.06 h, 1.23 h, 1.68 h e 1.91 h nas modelagens subsequentes. Nota-se que nesta região, o tempo em que a área ficou submersa foi menor, provavelmente devido a maior capacidade de projeto da canalização (com relação ao trecho da Via Parque). Considerando o maior evento computado, o tempo de chegada da onda de inundação nos imóveis próximos é de 0.48 h, a partir do início da chuva.

O risco às edificações também aumenta com o tempo de recorrência, já que um número maior destas são atingidas pela água. Vale ressaltar que várias edificações nesta região possuem um grau de resiliência as inundações, graças a elevação maior da fundação (taludes de terra) ou ainda com muretas de proteção, mas com chuvas acima de TR = 10 anos, o nível de água é suficiente para alcançar estas construções.

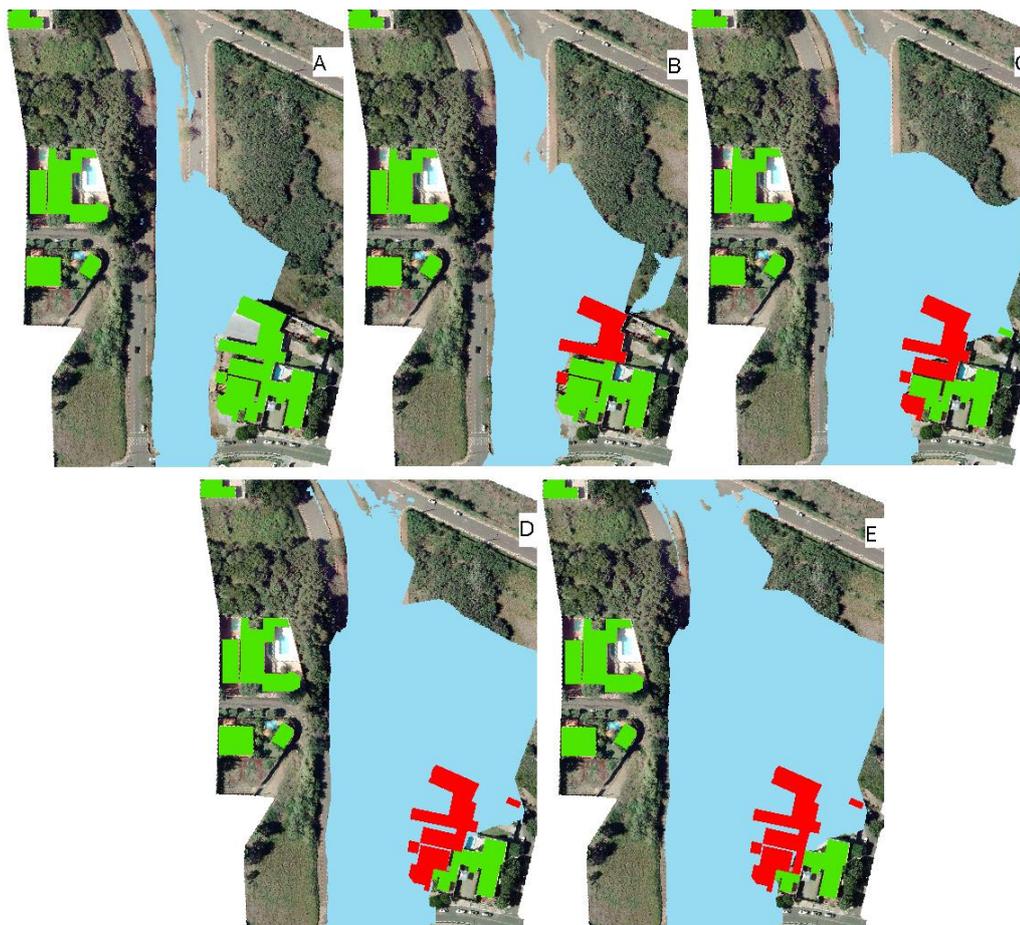


Figura 22 - Manchas de inundação para a região da Av. Ricardo Brandão. Das letras A, B, C, D e E, temos as áreas relacionadas ao evento de calibração e TR = 5, 10, 50 e 100 anos respectivamente. Blocos em vermelho representam construções afetadas. Elaborado pelos autores.

3.3.4 Velocidade do Fluxo

KREIBICH et al. (2009) discorre sobre os efeitos da velocidade do fluxo nos danos potenciais causados por inundações, sugerindo que este indicador é o principal a ser levado em conta quando se trata de danos causados aos pavimentos. Na simulação do Prosa, vemos diversos pontos com a velocidade da água no canal excedendo o limite padrão de 3 m/s para proteção de canais em concreto simples, o que valida imagens de trechos avariados após sucessivos eventos de cheia (Figura 23). Dentre os trechos críticos para danos causados por altas velocidades estão: a saída da galeria fechada da Via Parque (3.35 m/s), degraus repetidos no Parque Estadual Águas do Prosa (6.02 m/s) e a saída da barragem número 7 (5.39 m/s).

Ao mesmo tempo que notamos áreas de alta velocidade, temos também trechos onde o fluxo se torna inefetivo (velocidade do escoamento próxima de zero), gerando

zonas de recirculação ideais para a deposição de sedimentos (LAKZIAN; SAGHI e KOOSHKI, 2020), que contribuem no longo prazo para reduzir o transporte de vazão no canal, aumentando o risco de inundações.

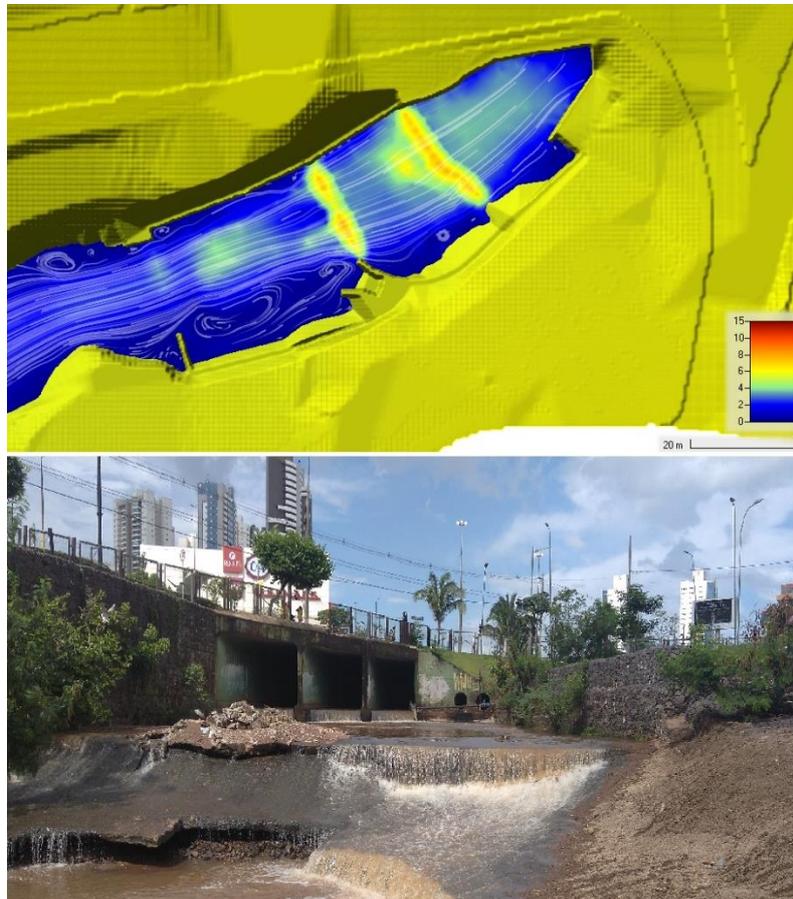


Figura 23 - Seção do Parque Ecológico Águas do Prosa, com a simulação da velocidade e linhas de fluxo (figura superior), bem como a imagem real (figura inferior), evidenciando a deterioração do canal nesta área, bem como bancos de areia na lateral direita da imagem. Elaborado pelos autores.

3.3.5 Cachoeira

Um dos grandes desafios desta simulação foi estabilizar a região conhecida como cachoeirinha do Prosa, um desnível de aproximadamente 5,5m ao longo de 18.6m, resultando em um declive de 0.29m/m. Apesar da equação de águas rasas conseguir lidar bem com fluxos no regime supercrítico, uma grande descontinuidade como esta previne a convergência dos resultados, que levaram a falha do modelo nas primeiras tentativas de simulação. Para contornar o problema, BRUNNER (2020) sugere duas alternativas: o uso de estruturas de conexão (como vertedouros), ou ainda o aumento da resolução da malha, junto com a redução do passo de tempo computacional.

Utilizamos a segunda alternativa para a simulação do Prosa, juntamente com a proposição de, sugerindo o aumento da rugosidade no local, para imitar os efeitos da dissipação de energia.

Para o evento teste TR = 5 anos, comparando as malhas geométricas (Figura 24) de resolução mediana (células de 3x3m) com resolução alta (0.5x0.5m), com o mesmo passo de tempo de 1s e rugosidade com n de Manning de 0.15, vemos um hidrograma de nível com oscilações menores na segunda simulação (Δh máximo de 0.62m com grid 3x3m, e Δh máximo de 0.28m com grid 0.5x0.5m).

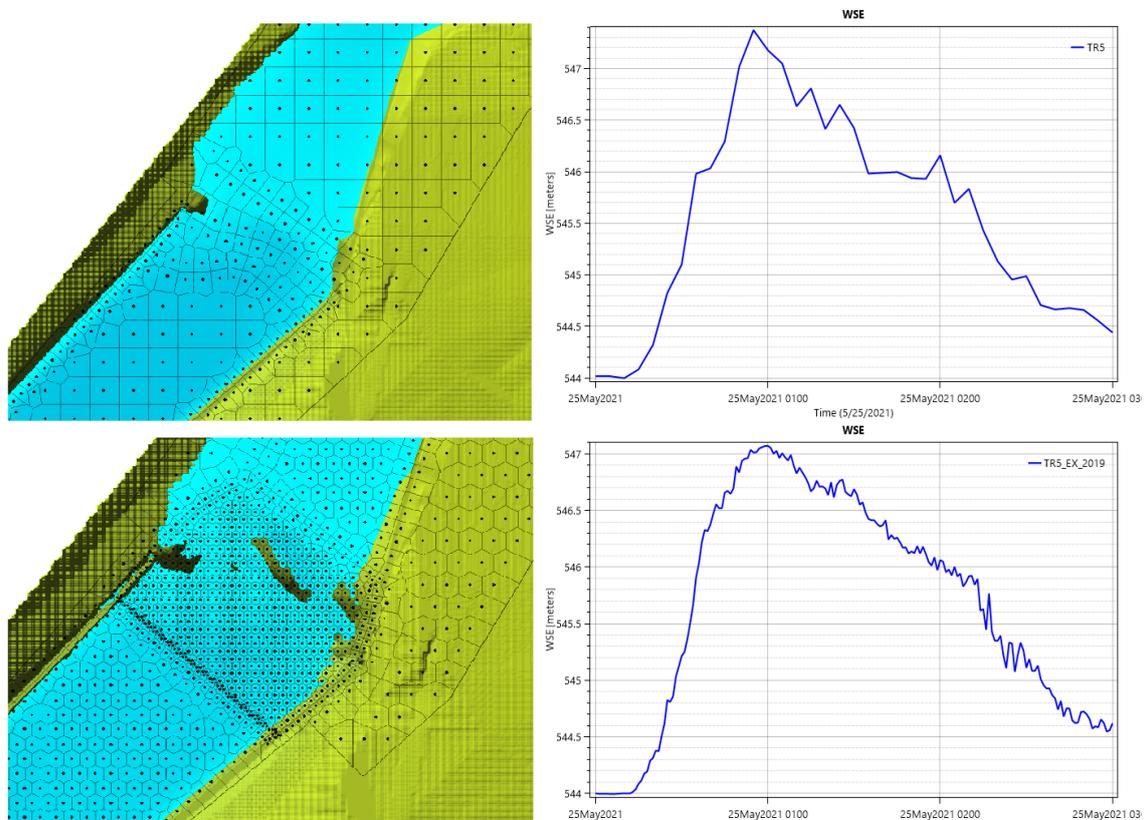


Figura 24 - Comparação dos hidrogramas de nível para a jusante da cachoeira do Prosa, para os cenários com malha de 3x3m (superior) e 0.5x0.5m (inferior). Elaborado pelos autores.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, investigamos a modelagem acoplada de modelo hidrológico e hidráulico (HEC-HMS e HEC-RAS) com dados topográficos e hidrometeorológicos de alta resolução espacial e temporal na geração de eventos de inundação em um canal de pequeno porte urbano localizado no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Além disso, geramos cenários de inundação com chuvas sintéticas representativas para a bacia, com tempos de retornos (TR) de 5, 10, 50 e 100 anos.

Nossos resultados indicam um bom ajuste na calibração e validação do HEC-HMS, com valores de R^2 , RMSE e NSE chegando a 0.93, 1.29 e 0.92 respectivamente, comparáveis aos estudos de mesma natureza realizados no Brasil. No HEC-RAS obtivemos valores de $R^2 = 0.87$, $RMSE = 0.57$ e $NSE = 0.85$ para calibração, e sua validação, baseada em critérios gráficos atingiu $F = 68\%$, o mesmo patamar de outros estudos que utilizaram este modelo hidráulico. A taxa de ajuste mediana da mancha de inundação pode estar ligada a deficiências no MDT, de modo que a qualidade dos modelos de terreno utilizados nestes estudos deve ser criteriosamente avaliada, para aumentar a precisão das manchas geradas.

Dificuldades inerentes a modelos hidráulicos bidimensionais, como instabilidades iniciais e divergência em locais com desníveis e declives acentuados, podem ser evitados e minimizados, com ajuda de simulações de aquecimento (estabelecendo vazão de base) e alta discretização da malha geométrica e do passo de tempo.

Verificamos que o córrego Prosa é especialmente vulnerável as cheias, já que precipitações com TR baixo de 5 anos já propiciam áreas de inundação em diversas regiões no canal. Na seção exutório, vazões de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ levam o canal a situação de transbordamento, com a água chegando a valores de cota 5 m acima do leito. Velocidades superiores a 3 m/s em diversos pontos contribuem para a deterioração dos trechos canalizados, reduzindo a vida útil das obras hidráulicas.

Nossos achados mostram que canais da bacia do Prosa possuem sua planície de inundação comprometida em função de uso e cobertura do solo, e condições ambientais locais. Concluimos que a modelagem acoplada de alta resolução gerou informações que representam satisfatoriamente as características do fluxo em canais de pequeno porte, retratando as fragilidades da rede de drenagem frente cenários extremos, munindo autoridades com dados valiosos para a realização do planejamento eficiente de uso e adequações que se façam necessárias em áreas vulneráveis.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIGHI, C.; CAMPO, L. Effects of digital terrain model uncertainties on high-resolution urban flood damage assessment. **Journal of Flood Risk Management**, v. 12, n. February 2018, p. 1–12, 2019.

AZAM, M.; KIM, H. S.; MAENG, S. J. Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 21, n. November 2016, p. 11–26, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.11.008>>.

BHADORIYA, U. P. S. et al. Implications of climate change on water storage and filling time of a multipurpose reservoir in India. **Journal of Hydrology**, v. 590, n. September, p. 125542, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125542>>.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis Systems User's Manual**, 2016. .

BRUNNER, G. W. **HEC RAS: River Analysis System - Hydraulic Reference Manual** Davis, CA, 2020. .

DE ANDRADE, C. W. L. et al. Soil moisture and discharge modeling in a representative watershed in northeastern Brazil using SWAT. **Ecohydrology and Hydrobiology**, v. 19, n. 2, p. 238–251, 2019.

DE ARRUDA GOMES, M. M.; DE MELO VERÇOSA, L. F.; CIRILO, J. A. **Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation**. [s.l.] Springer Netherlands, 2021. v. 108

DEVI, N. N.; SRIDHARAN, B.; KUIRY, S. N. Impact of urban sprawl on future flooding in Chennai city , India. **Journal of Hydrology**, v. 574, n. March 2018, p. 486–496, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.041>>.

DIAS, A. M.; SANTOS, A. dos; PRADO, F. **Córrego Prosa transborda, alaga avenidas e bloqueia trânsito da Capital**. Disponível em: <<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/corrego-prosa-transborda-alaga-avenidas-e-bloqueia-transito-da-capital>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

DOS SANTOS, M. F. N.; BARBASSA, A. P.; VASCONCELOS, A. F. Low impact development strategies for a low-income settlement: Balancing flood protection and life cycle costs in Brazil. **Sustainable Cities and Society**, v. 65, n. 14, 2021.

DU, J. et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin , China. **Journal of Hydrology**, v. 465, p. 127–139, 2012.

ELMOUSTAFA, A. M.; SAAD, N. Y.; FATTOUH, E. M. Defining the degree of flood hazard using a hydrodynamic approach , a case study : Wind turbines field at west of Suez Gulf. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 3, p. 741–749, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.12.005>>.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic Modelling System: HEC-HMS - Technical Reference Manual**. [s.l.: s.n.].

FRIAS, S. **Temporal provocou alagamentos em toda a extensão do Córrego Prosa**. Disponível em: <<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/temporal-provocou-alagamentos-em-toda-a-extensao-do-corrego-prosa>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

GAIGHER, C. **Com histórico de inundações, Campo Grande registra problemas nas mesmas regiões há 10 anos.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2019/03/02/com-historico-de-inundacoes-campo-grande-registra-problemas-nas-mesmas-regioes-ha-10-anos.ghtml>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

GOMES CALIXTO, K.; WENDLAND, E. C.; MELO, D. de C. D. Hydrologic performance assessment of regulated and alternative strategies for flood mitigation: a case study in São Paulo, Brazil. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 5, p. 481–489, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1773509>>.

GUO, K.; GUAN, M.; YU, D. Urban surface water flood modelling-a comprehensive review of current models and future challenges. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 5, p. 2843–2860, 2021.

KAFFAS, K.; HRISSANTHOU, V.; SEVASTAS, S. Modeling hydromorphological processes in a mountainous basin using a composite mathematical model and ArcSWAT. **Catena**, v. 162, n. October 2017, p. 108–129, 2018.

KREIBICH, H. et al. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 9, n. 5, p. 1679–1692, 2009.

LAKZIAN, E.; SAGHI, H.; KOOSHKI, O. Numerical simulation of sediment deposition and trapping efficiency estimation in settling basins, considering secondary flows. **International Journal of Sediment Research**, v. 35, n. 4, p. 347–354, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.02.001>>.

LIN, W. et al. Science of the Total Environment Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study. **Science of the Total Environment**, v. 739, p. 139899, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139899>>.

MACIULEVICIUS, P. **Córrego Prosa alaga pontos e assusta na Avenida Ricardo Brandão.** Disponível em: <<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/corrego-prosa-alaga-pontos-e-assusta-na-avenida-ricardo-brandao>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

MATTOS, T. S. **Improving urban flood resilience.** 2021. UFMS, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/bitstream/123456789/3702/1/Tese_Corrigida.pdf>.

MERWADE, V. et al. Uncertainty in Flood Inundation Mapping : Current Issues and Future Directions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 608–620, 2008.

NA, W.; YOO, C. Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 10, 2018.

NETO, O. C. L. et al. Sub-daily hydrological-hydrodynamic simulation in flash flood basins: Una river (Pernambuco/Brazil). **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2020.

NRCS; USDA. **Urban Hydrology for Small Watersheds Technical Release.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology+for+Small+watersheds#1>>.

OLIVEIRA, V. **Chuva forte alaga casas no Dalva de Oliveira e assusta moradores;**

veja vídeo. Disponível em:

<<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/chuva-forte-alaga-casas-no-dalva-de-oliveira-e-assusta-moradores-em-campo-grande>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

OLIVEIRA, V. Chuva na madrugada enche córregos, alaga casas e causa destruição. Disponível em:

<<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/chuva-na-madrugada-enche-corregos-alaga-casas-e-causa-destruicao>>.

OSMAN, S. et al. Flood Modeling of Sungai Pinang Watershed Under the Impact of Urbanization. **Tropical Cyclone Research and Review**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tcrr.2021.06.001>>.

PAPPENBERGER, F. et al. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. **Journal of Hydrology**, v. 302, n. 1–4, p. 46–69, 2005.

PATHAK, S. et al. 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**, v. 591, n. February, p. 125216, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125216>>.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

PÉREZ-MORALES, A.; GIL-GUIRALDO, S.; OLCINA-CANTOS, J. Housing bubbles and the increase of flood exposure . Failures in flood risk management on the Spanish south-eastern coast (1975 – 2013). **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. 302–313, 2018.

RANGARI, V. A.; UMAMAHESH, N. V.; PATEL, A. K. Flood-hazard risk classification and mapping for urban catchment under different climate change scenarios: A case study of Hyderabad city. **Urban Climate**, v. 36, n. February, p. 100793, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100793>>.

ROCHA, A.; PEREIRA, L. An interactive Web-GIS fluvial flood forecast and alert system in operation in Portugal. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 58, n. January, 2021.

RODRIGUES, N.; VASCONCELOS, N. Córrego transborda e carro quase é levado pela água na Ricardo Brandão. Disponível em:

<<https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/corrego-transborda-e-carro-quase-e-levado-pela-agua-na-ricardo-brandao>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

ROSAS, M. A. et al. The potential impact of climate variability on siltation of Andean reservoirs. **Journal of Hydrology**, v. 581, n. March 2019, p. 124396, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124396>>.

SCHARFFENBERG, W. **HEC HMS: Hydrologic Modelling System - User's Manual**, 2016. .

SHAO, M. et al. Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote water security — A case study of two adjacent basins in Texas ☆. **Journal of Hydrology**, v. 589, n. June, p. 125154, 2020. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125154>>.

SOLDEVILA, R. B.; BARTUAL, R. G.; DOMÉNECH, I. A. A comparison of design storms for urban drainage system applications. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 2019.

SPECKHANN, G. A. et al. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 1, p. 87–100, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>>.

SPENCE, C. On the relation between dynamic storage and runoff: A discussion on thresholds, efficiency, and function. **Water Resources Research**, v. 43, n. 12, p. 1–11, 2007.

STEVENS, M. R.; SONG, Y.; BERKE, P. R. New Urbanist developments in flood-prone areas : safe development , or safe development paradox ? **Natural Hazards**, v. 53, p. 605–629, 2010.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 90, p. 201–216, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>>.

VASCONCELLOS, S. M. et al. Flood Hazard Mapping in Alluvial Fans with Computational Modeling. **Water Resources Management**, v. 35, n. 5, p. 1463–1478, 2021.

YALCIN, E. Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. **Natural Hazards**, v. 101, n. 3, p. 995–1017, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>>.

ZAMBRANO, F. C. et al. Influence of different sources of topographic data on flood mapping: urban area São Vendelino municipality, southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 40, p. 13, 2020.

ZHANG, B. et al. Large-scale 3D numerical modelling of flood propagation and sediment transport and operational strategy in the Three Gorges Reservoir , China. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 36, n. February, p. 33–49, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.03.003>>.

ZHOU, Q. et al. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. **Journal of Hydrology**, v. 414–415, p. 539–549, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.031>>.

ZOPE, P. E.; EL DHO, T. I.; JOTHIPRAKASH, V. Catena Impacts of land use – land cover change and urbanization on flooding : A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai , India. **Catena**, v. 145, p. 142–154, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.009>>.

CAPÍTULO 3

RELAÇÕES DE CAUSALIDADE ENTRE EVENTOS DE INUNDAÇÃO E DESENVOLVIMENTO URBANO, PARA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA

Bruno, L. S.; Oliveira, P. T. S.; Rodrigues, D. B. B.

Em preparação de submissão para o periódico *Hydrological Sciences Journal*.

RESUMO

Apesar de avanços tecnológicos em obras para contenção e mitigação, e de técnicas para o mapeamento de áreas de risco, muitas cidades ainda sofrem com problemas relacionados a inundações. Neste estudo buscamos encontrar padrões que possam explicar o insucesso das medidas clássicas adotadas contra inundações em uma bacia hidrográfica urbana localizada no centro oeste do Brasil. Além disso, investigamos cenários de danos potenciais causados por eventos de inundação, derivados de chuvas projetadas com diferentes tempos de retorno, em conjunto a curvas de dano econômico. Para tanto usamos dados hidrometeorológicos observados para calibrar e validar os modelos hidrológico e hidráulico HEC-HMS e RAS. Para contabilizar estruturas, funções de dano e manchas de inundação utilizamos o HEC-FIA. Posteriormente realizamos simulações com eventos pluviométricos para os períodos de retorno (TR) de 5, 10, 50 e 100 anos. Os modelos hidrológicos e hidráulico conseguiram boa representação de eventos extremos na bacia, com Nash-Sutcliff Efficiency (NSE) de 0.92 e 0.87 para o período de calibração, respectivamente. Investigação do histórico de inundações na bacia demonstra a periodicidade dos eventos de inundação, que se repetem em vários anos, nos mesmos locais, mesmo com a execução de medidas de mitigação. Nossos resultados indicam que o potencial para danos na bacia cresce exponencialmente com o aumento do TR, podendo chegar a 479 mil US\$ para um TR=100 anos, o que equivale a 7% do Produto Interno Bruto (PIB) municipal. Esse custo estimado corresponde principalmente ao conteúdo das edificações próximas ao canal, incluindo residências e comércio. Também verificamos o papel das medidas de proteção contra inundações, que conseguem reduzir o pico de uma chuva com TR = 5 anos em 12%, sendo insuficiente para evitar o transbordamento do canal nos trechos críticos. Deste modo, fica claro a necessidade de investimentos em infraestrutura de drenagem na bacia de estudo, que devem ser criteriosamente estudados para atender as demandas ao mesmo tempo que custem o mínimo possível, e o uso da modelagem hidrológica-hidráulica acoplada com um modelo de danos, prova-se um ferramental útil para ajudar no processo de otimização de medidas contra inundações.

Palavras-Chave: Inundações, Padrões Urbanos, Socio-Hidrologia, HEC-FIA, Prejuízos.

ABSTRACT

Despite technological advances in containment and mitigation works, and techniques for mapping risk areas, many cities still suffer from problems related to flooding. In this study, we seek to find patterns that can explain the failure of the classic measures adopted against flooding in an urban watershed located in the center-west of Brazil. In addition, we investigate potential damage scenarios caused by flash-flood events, derived from projected rainfall with different return times, together with economic damage curves. For this we use observed hydrometeorological data to calibrate and validate the hydrological and hydraulic models HEC-HMS and RAS. To account for structures, damage functions and flood spots we use the HEC-FIA. Subsequently, we performed simulations with rainfall events for the return periods (TR) of 5, 10, 50 and 100 years. The hydrological and hydraulic models achieved good representation of extreme events in the basin, with Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.92 and 0.87 for the calibration period, respectively. Investigation of the history of flooding in the basin demonstrates the periodicity of flood events, which are repeated over several years, in the same places, even with the implementation of mitigation measures. Our results indicate that the potential for damage in the basin grows exponentially with the increase of the TR, reaching 479 thousand US\$ for a TR=100 years, which is equivalent to 7% of the municipal Gross Domestic Product (GDP). This estimated cost corresponds mainly to the content of buildings close to the canal, including homes and commerce. We also verified the role of protection measures against flooding, which manage to reduce the peak of rain with TR = 5 years by 12%, being insufficient to prevent the channel from overflowing in critical stretches. Thus, it is clear the need for investments in drainage infrastructure in the study basin, which must be carefully studied to meet the demands while costing the least possible, and the use of hydrological-hydraulic modeling coupled with a damage model, proves to be a useful tool to help in the process of optimizing measures against flooding.

Keywords: Floods, Urban Patterns, Socio-hydrology, HEC-FIA, Damages.

1. INTRODUÇÃO

Em regiões habitadas que sejam propensas a inundações, é comum e necessário que se adotem medidas para evitar os efeitos das cheias, para que o desenvolvimento econômico e bem-estar social locais não sejam afetados. Neste aspecto, MONDAL; MURAYAMA e NISHIKIZAWA (2021) destacam a implementação de um conjunto de medidas que podem ser estruturais, como barreiras, diques, canalizações e estruturas de bombeamento, ou não estruturais, como leis e diretrizes de uso e ocupação do solo. Além dessas medidas clássicas, diversos estudos citam o positivo papel coadjuvante das medidas complementares na mitigação do risco de inundações, incluindo os sistemas de alerta (SHIH; KUO e LAI, 2019), obras de integração natural (HANKIN et al., 2021), construções de baixo impacto (GONCALVES et al., 2018), e soluções adaptativas individuais (NOFAL; LINDT, 2020). Para que todas estas medidas sejam implementadas, estudos minuciosos sobre mapeamento de áreas vulneráveis, volumes excedentes e custos de implantação são requeridos, contudo, MERZ et al. (2010), destaca que as avaliações de danos econômicos potenciais (ou mitigados) são geralmente negligenciadas, apesar de ser peça chave para análise de custo-benefício de medidas (principalmente estruturais), além de alocação de recursos emergenciais.

Para avaliar a quantidade de danos causados pelas cheias, em valor econômico, geralmente são empregados nos modelos as chamadas curvas cota x prejuízos. Como descrito por MARTÍNEZ-GOMARIZ et al. (2020), são funções que representam a vulnerabilidade das edificações, relacionando o nível de água incidente ao dano causado (em moeda, como uma porcentagem do custo do objeto), ou mesmo de maneira normalizada, relacionando o nível com a porcentagem da edificação afetada. No entanto, no Brasil ainda existem poucos estudos sobre este tipo de função, ou ainda aplicando estas. NASCIMENTO et al. (2007) desenvolveu curvas de funções de dano para um evento de inundação extremo ocorrido em Minas Gerais no ano 2000 que posteriormente foi usado para embasar um trabalho da União Europeia para determinar curvas de funções de dano em escala global, sendo o estudo representativo da América do Sul para algumas categorias, como dano residencial e industrial (HUIZINGA; DE MOEL; SZEWCZYK, 2017).

Quando implantadas, as medidas de prevenção de inundações geram mais segurança as populações vulneráveis, no entanto, não são a garantia de que nas regiões naturalmente propensas, sempre haverá segurança contra as inundações. SCHLÖGL et al. (2021) por exemplo, relata que para um cenário de longo prazo, onde mudanças climáticas resultam em um aumento de eventos extremos, a perda de efetividade de medidas estruturais clássicas (como no fim do ciclo de vida estrutural), pode aumentar drasticamente o risco de inundações de alto prejuízo.

Existe assim a falta no planejamento de ações multidisciplinares contra inundações que propicie um desenvolvimento sustentável das técnicas de proteção. Neste sentido, SIVAPALAN; SAVENIJE e BLÖSCHL (2012) propõem e discutem sobre a socio-hidrologia, adicionando a variável comportamento humano no modo de enfrentamento as crises hidrológicas. Nos estudos socio-hidrológicos, podemos ver o grau de complexidade entre as interações de humanos com as inundações, que formam um sistema dinâmico e interdependente. DI BALDASSARRE et al. (2013), por exemplo, desenvolveram um sofisticado modelo de trabalho para identificar o risco de inundações, trazendo a mesa de análise as interconexões entre hidrologia, economia, política, tecnologia e social, determinando o comportamento destas variáveis para diferentes cotas de cheia. O resultado é complementar já explorado anteriormente, a ação humana gerou uma diferença entre os eventos do passado (fracos, porém numerosos), para os futuros (poucos, mas catastróficos).

E evidente a importância da abordagem de socio-hidrologia na mitigação de problemas relacionais a inundações. No entanto, essa abordagem ainda é pouca explorada no Brasil. VANELLI e KOBIYAMA (2020), em busca nas bases de dados *Web of Science* e *Google Scholar*, verificaram durante o período de 2009 a 2019 um total de 212 publicações em periódicos sobre o tema de sociohidrologia, mas nenhum desses realizados no Brasil. Apenas recentemente publicações tem trazido ao âmbito nacional as aplicações socio-hidrológicas, como os modelos matemáticos (CAROLINA et al., 2020) e análises de interdependência (FROTA et al., 2021).

Assim, o presente estudo objetifica identificar potenciais valores de dano para cenários de inundações modelados para uma bacia hidrográfica urbana localizada no centro oeste do Brasil. Para tanto usamos dados hidrometeorológicos observados para calibrar e validar os modelos hidrológico e hidráulico HEC-HMS e RAS. Para

contabilizar estruturas, funções de dano e manchas de inundação utilizamos o HEC-FIA. Posteriormente realizamos simulações com eventos pluviométricos para os períodos de retorno (TR) de 5, 10, 50 e 100 anos. Além disso, realizamos uma análise deste histórico de obras e eventos extremos, tentando encontrar padrões e causas que possam explicar a cronicidade das inundações, dentro das relações investigadas pela socio-hidrologia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do córrego Prosa (Figura 25 - Bacia hidrográfica do córrego Prosa, com situação geográfica. Escala 1:75000. Elaborado pelos autores.) é uma pequena bacia urbana, com área/perímetro de 31,97 km²/28.63 km, localizada dentro do perímetro urbano de Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul. Existem sete canais de macrodrenagem nesta área, a contar pelos córregos Prosa, Sóter, Desbarrancado, Joaquim Português, Pindaré, Réveillon e Vendas. Possui uma área com paisagem que varia de densamente urbanizada (bairros da região central) a mata nativa (parques ecológicos e áreas de proteção permanente), sendo que no ano de 2016, possuía 51% de área impermeabilizada (MATTOS, 2021).

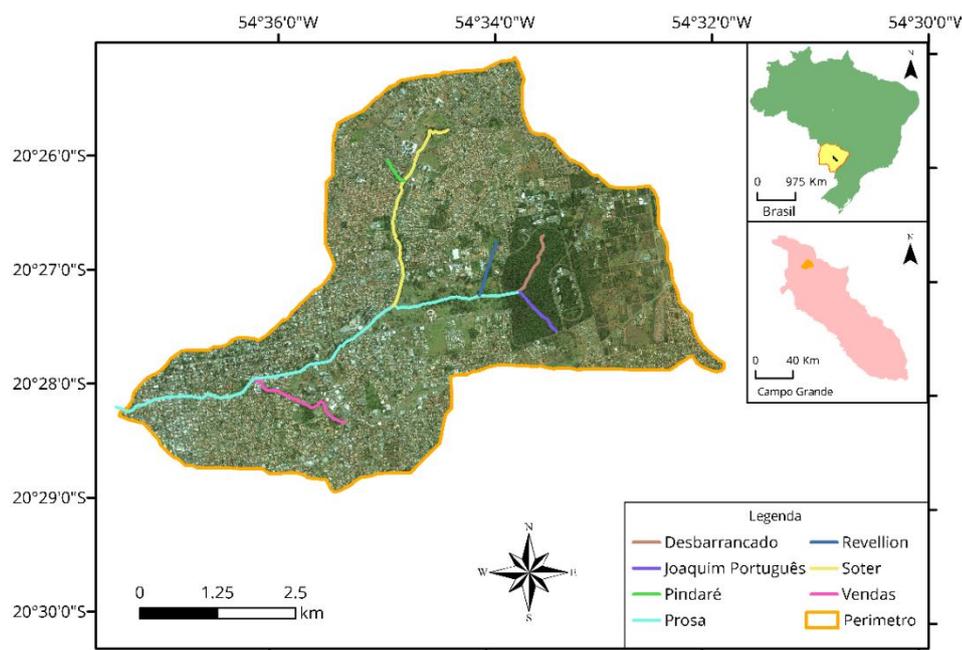


Figura 25 - Bacia hidrográfica do córrego Prosa, com situação geográfica. Escala 1:75000. Elaborado pelos autores.

É uma bacia integrante do bioma Cerrado, e seu clima é característico de tropical com estação seca (PEEL; FINLAYSON e MCMAHON, 2007), com verões quentes e úmidos (janeiro com pluviosidade de 218 ± 84 mm e temperatura média de 25.1°C) e invernos amenos e seco (agosto com chuvas de 34 ± 34 mm, e temperatura média de 21.8°C). A pluviosidade total é de 1445 ± 273 mm. Os dados de precipitação foram coletados do pluviômetro 2054014 (gerenciado pela ANA, Agência Nacional de Águas), no período de 2015 a 2017 e temperaturas extraídas das normais climatológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Na bacia do Prosa existem ao menos quatro locais que são conhecidos por ocorrer extravasamento da água da calha dos canais (Figura 26), sendo os mais críticos ocorrendo na Via Parque e na Av. Ricardo Brandão. Na Via Parque (vocativo local do conjunto das avenidas Arq. Rubens Gil de Camilo e Prof. Luís Alexandre) a área de inundação se dá a partir da confluência dos córregos Prosa e Sóter, e se estende até a saída do piscinão lateral do córrego Prosa. Na Ricardo Brandão, a inundação começa na altura da segunda ponte sobre o córrego Prosa (no sentido do fluxo), e se estende até o final da avenida.

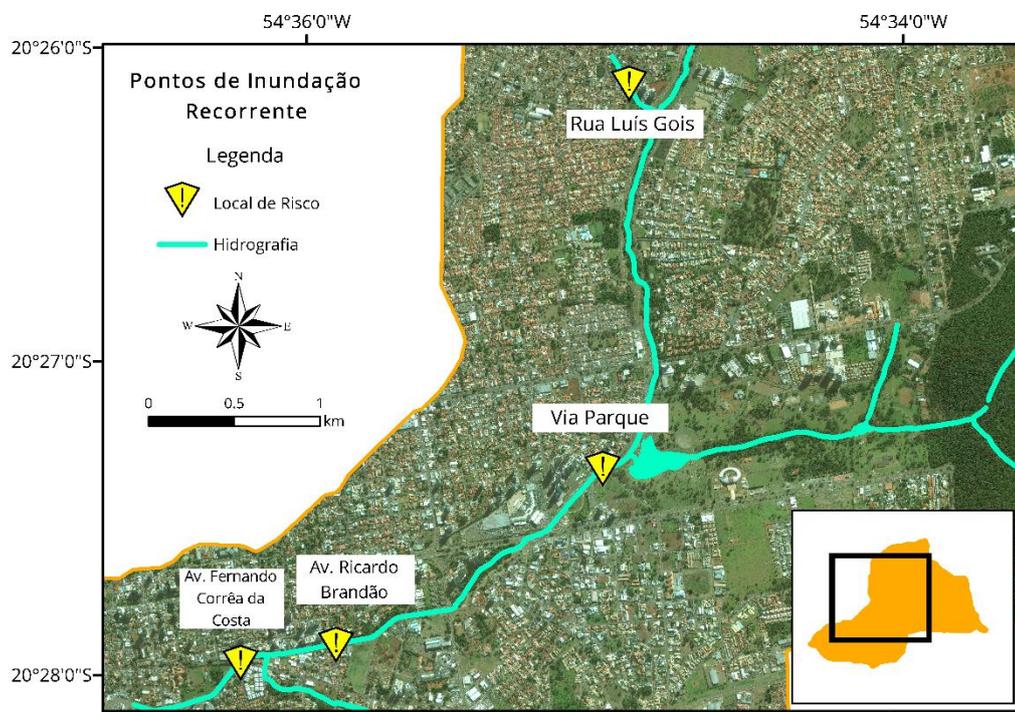


Figura 26 - Pontos de inundação recorrente na bacia hidrográfica do córrego Prosa. Marcações com os nomes dos logradouros atingidos. Elaborado pelos autores.

2.2 Delimitação do Estudo

Este trabalho está dividido em duas etapas (Figura 27). Na primeira, pretendemos analisar o histórico das inundações na região do córrego Prosa, bem como as mudanças ocorridas na bacia até chegarmos na configuração atual (como a implantação de medidas contra cheias), procurando padrões de repetições de eventos que possam nos afirmar o impacto que as diversas áreas da sociedade têm na evolução dos fenômenos.

Na segunda fase, analisamos os danos econômicos (do tipo direto e tangível), computados a partir de dados das edificações (distintas por classes), justapostos a manchas de inundação (obtidas via simulação hidrológica/hidráulica) e relacionados por uma curva cota x prejuízo para cada categoria, utilizando o pacote HEC-FIA. A vulnerabilidade da população nos cenários simulados também será avaliada.

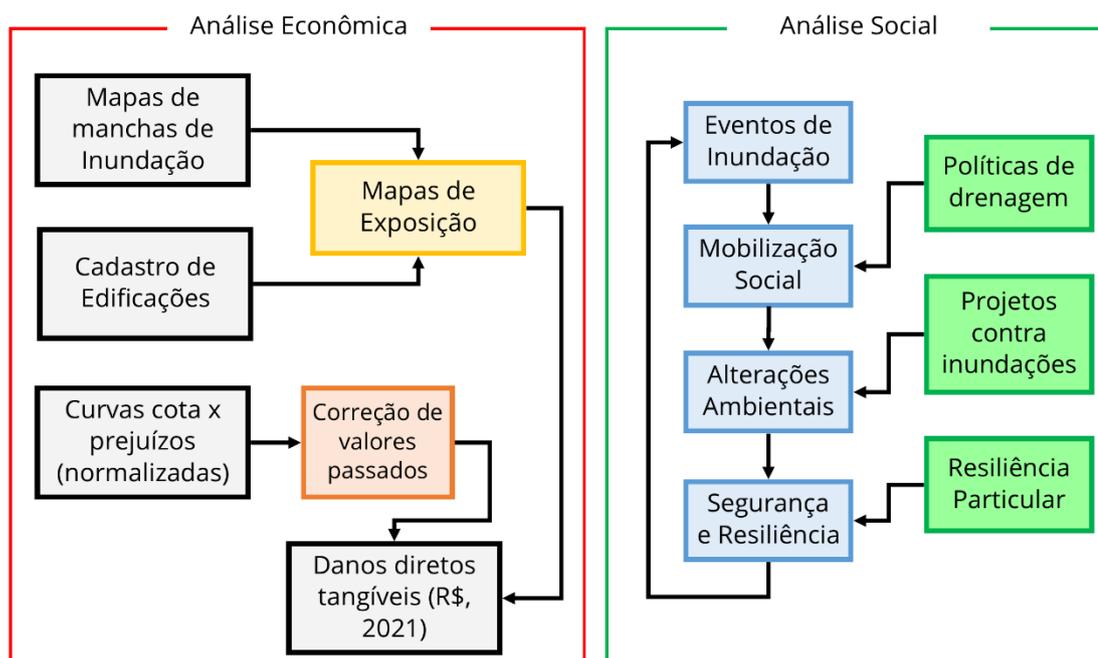


Figura 27 - Metodologias para análise socioeconômica adotadas neste estudo. Elaborado pelos autores.

2.3 Dados Utilizados

Para a criação dos cenários de inundação, vamos utilizar simulações hidrológicas-hidráulicas realizadas anteriormente pelos autores para a bacia

hidrográfica do Prosa, com os pacotes HEC-HMS e HEC-RAS. Foram utilizadas manchas de eventos reais, bem como simuladas, baseadas em chuvas de projeto com diferentes tempos de retorno (5, 10, 50 e 100 anos). Estas modelagens trazem mapas de inundação, hidrogramas de vazão e nível, geometria da área, além de informações relativas à onda de inundação (como duração, velocidade, tempo de chegada e abatimentos).

Os resultados da modelagem indicam um bom ajuste na calibração e validação do HEC-HMS, com valores de R^2 , RMSE e NSE chegando a 0.93, 1.29 e 0.92 respectivamente. No HEC-RAS obtivemos valores de $R^2 = 0.87$, RMSE = 0.57 e NSE = 0.85 para calibração, e sua validação, baseada em critérios gráficos atingiu $F = 68\%$, o mesmo patamar de outros estudos que utilizaram este modelo hidráulico.

Para caracterizar a área de estudo, utilizamos ortofotos municipais dos anos de 2013 e 2016 de alta resolução espacial, 0.1 e 0.6 m, respectivamente. Essas imagens foram usadas principalmente para vetorização de objetos estruturais tais como residências, comércios e indústrias. Também utilizamos imagens do *Google Earth* e *Google Street View*, além de diversas fotografias feitas in loco. Os dados do último censo de 2010 da população nas proximidades dos canais estudados foram obtidos no IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Dados históricos de eventos de inundação foram pesquisados via veículos de imprensa, tais como jornais locais e trabalhos acadêmicos anteriores publicados em periódicos ou disponíveis em teses e dissertações.

2.4 Avaliação do Histórico de Inundações da Bacia do Prosa

O histórico da bacia do Prosa foi avaliado de maneira temporal, discorrendo sobre o desenvolvimento do sistema de drenagem ao longo dos anos, incluindo as obras e estudos realizados pelo poder público. Utilizando matérias jornalísticas dos principais veículos de mídia locais, bem como reportagens, publicações em periódicos, teses e dissertações, e consulta a documentos públicos de livre acesso na internet. As análises foram baseadas em critérios visuais e percepções, e refletem as impressões causadas pelas repercussões e entrevistas de

pessoas da região a imprensa. Algumas idas a campo também foram úteis para compreender processos e dinâmicas da bacia, facilitando o entendimento sobre os principais pontos da área.

2.5 Simulação de Danos Econômicos

Considerando as edificações as margens dos canais estudos como os elementos sob risco, o mapeamento destas pode ser realizado utilizando as ortofotos de alta resolução. Dentro do ambiente Sistema de Informações Geográficas - SIG, camadas vetoriais para cada tipo de edificação foram geradas manualmente (Figura 28), dentro dos limites de área de uma quadra urbana, a partir da margem esquerda e direita dos canais. Para homogeneizar as classes das construções, recorreremos a duas diferenciações de estruturas, uma proposta pela norma brasileira NBR 12721 (ABNT, 2011), aplicadas normalmente em estudos de vistoria de imóveis urbanos, com o objetivo de diferenciar as estruturas dos lotes. Na segunda, identificamos o conteúdo interno dos objetos.

O enquadramento proposto pela norma é baseado em projetos padrão (Tabela 6), de residências, prédios, comércios e galpões, caracterizados pelo acabamento do exterior (análise visual). Para tanto, visitas *in loco* e extensivo uso das imagens do *Google Street View* foram parte integrante do processo classificatório. Dos 15 projetos tipo, 7 estão presentes na área de estudo, incluindo residências/comércios de alto, médio e baixo padrão, residências populares multifamiliares, prédios com até 8 pavimentos e até 16 pavimentos, além de galpões. Infelizmente, a norma não possui um projeto padrão para comércios simples, de um até 7 pisos, de forma que lançamos a hipótese de que estes sejam enquadrados como uma residência média (R1M), multiplicado pelos pisos, caso possua.

Tabela 6 - Projetos padrões da NBR 12721. Elaborado pelos autores.

| Projeto Padrão | Descrição |
|-----------------------|--|
| R1B | Residência unifamiliar de classe baixa |
| R1N | Residência unifamiliar de classe média |
| R1A | Residência unifamiliar de classe alta |

| RPIQ | Residência popular |
|-------|--|
| PIS | Projeto residencial de interesse social |
| PPB | Prédio popular de classe baixa |
| PPN | Prédio popular de classe média |
| R8B | Residência multifamiliar de classe baixa (8 pavimentos) |
| R8N | Residência multifamiliar de classe média (8 pavimentos) |
| R8A | Residência multifamiliar de classe média (8 pavimentos) |
| R16N | Residência multifamiliar de classe média (16 pavimentos) |
| R16A | Residência multifamiliar de classe alta (8 pavimentos) |
| CSL8 | Comercial Salas e Lojas (8 pavimentos) |
| CSL16 | Comercial Salas e Lojas (16 pavimentos) |
| CAL8 | Comercial Andar Livre (8 pavimentos) |
| GI | Galpão Industrial |

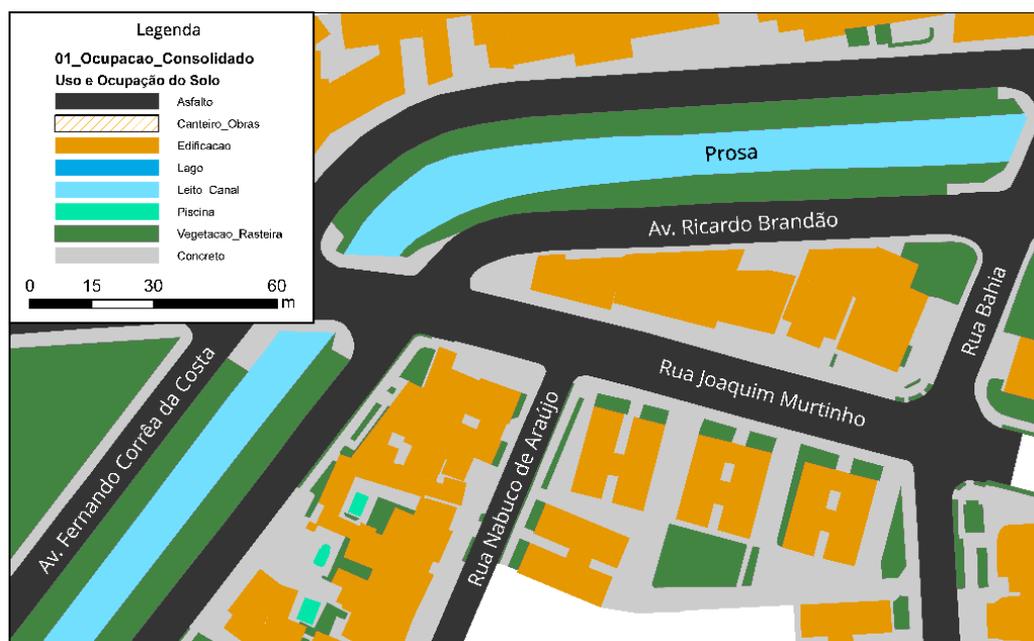


Figura 28 - Vetorização do uso e ocupação do solo das proximidades do canal. Destaque as edificações, em laranja. Elaborado pelos autores.

Quanto a segunda classificação (Figura 29), separamos as estruturas de acordo com as curvas desenvolvidas por NASCIMENTO et al. (2007), para residências (alto, médio e baixo padrão), comércios (alimentícios ou não) e serviços (escolar ou genérico). A pesquisa também foi efetuada por visitas e imagens da internet.

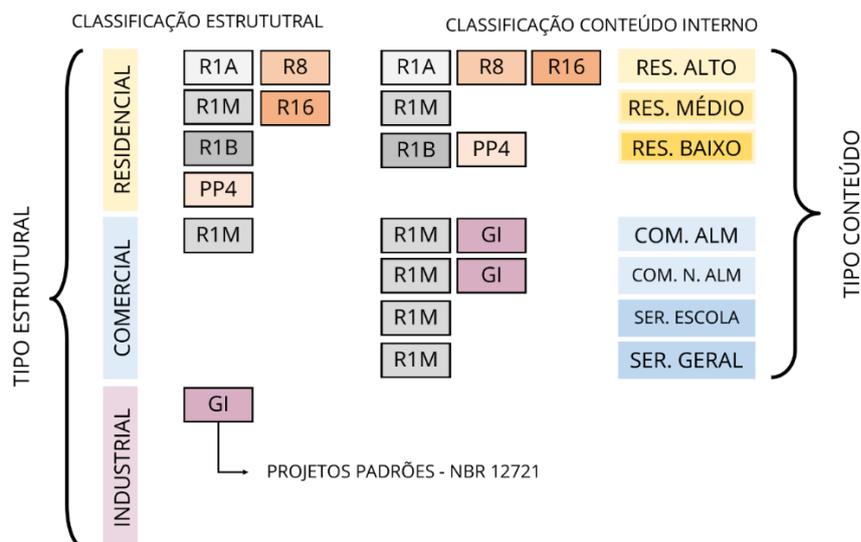


Figura 29 - Classificação das edificações, utilizada neste modelo. Elaborado pelos autores.

Para determinar o valor relativo as edificações, utilizamos uma abordagem para precificar a estrutura em si (prédio) e outra para os conteúdos (bens internos). Com relação ao montante predial, trabalhos como realizados por SALGADO (1995); NAGEM (2008) e PESSINA (2014) indicam a utilização do CUB (Custo Unitário Básico), que é o valor por metro quadrado do custo de construção de um tipo de projeto padrão, descrito pela NBR 12721 (projetos estes já utilizados para a classificação dos objetos de risco), e calculado mensalmente para todos os estados do Brasil, por meio dos sindicatos de construção civil.

Desta maneira, o prejuízo estrutural causado pelas inundações em um objeto sob risco pode ser dado pela equação 8, onde CUB é o custo unitário básico (R\$/m²), A_t é a área total (m²), f_e é um fator que ajusta a área total para uma área equivalente real, f_d é um fator de depreciação e $F(h)$ é o resultado da função de dano relativo (porcentagem da edificação danificada por causa de uma lâmina de água de altura h). Para obter os valores do CUB em dólares, executamos a conversão de câmbio do Real Brasileiro para o Dólar Americano, para a data de execução do estudo (02 de março de 2021 – R\$ 5.6838/US\$ 1.00).

$$P_{est} = (CUB \cdot A_t \cdot f_e) \cdot f_d \cdot F(h) \quad (8)$$

O fator de depreciação (Tabela 7) é uma recomendação de MERZ et al. (2010), para adequar os preços de construção ao tempo em que foi atingido. Existem diversas metodologias para o cálculo deste fator, a maioria envolvendo

variáveis que não estão à disposição, como o tempo de vida útil do empreendimento. Assim, usamos uma abordagem visual (levando em consideração o estado aparente de conservação), utilizando a tabela de depreciação de Heidecke (AWAD, 2017).

Tabela 7 - Fatores de depreciação de acordo com o estado de conservação. Adaptado de AWAD (2017)

| Estado de Conservação | Coefficiente de Depreciação |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Nova | 0 |
| Nova/Regular | 0.0032 |
| Regular | 0.0252 |
| Regular/Reparos Simples | 0.0809 |
| Reparos Simples | 0.1810 |
| Reparos Simples/Importantes | 0.3320 |
| Reparos Importantes | 0.5260 |
| Reparos Importantes/Sem Valor | 0.7520 |
| Sem valor | 1.0000 |

O fator de ajuste de área equivalente foi desenvolvido para ajustar o tamanho da área real aos valores de custo por área. A ideia é que o valor do CUB multiplicado pela área total pode levar a uma superestimação dos valores, já que varandas, banheiros, garagens e dispensas, por exemplo, precisam de menos materiais de construção que outras partes da edificação. Segundo a NBR 12721, as proporções de área equivalente e real estão dispostas na [Tabela 8](#).

Tabela 8 - Fatores de área equivalente para todos os projetos da NBR 12721. Elaborado pelos autores.

| Projeto (Fig. 5) | Area Real (R) | Area Eq. (E) | Razão E/R |
|-------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| R1B | 58.64 | 51.94 | 0.885744 |
| R1N | 106.44 | 99.47 | 0.934517 |
| R1A | 224.82 | 210.44 | 0.936038 |
| RP1Q | 39.56 | 39.56 | 1 |
| PIS | 991.45 | 978.09 | 0.986525 |
| PPB | 1415.07 | 927.08 | 0.655148 |

| | | | |
|-------|----------|---------|----------|
| PPN | 2590.35 | 1840.45 | 0.710502 |
| R8B | 2801.64 | 1885.51 | 0.673002 |
| R8N | 5998.73 | 4135.22 | 0.689349 |
| R8A | 5917.79 | 4644.79 | 0.784886 |
| R16N | 10562.07 | 8224.5 | 0.778683 |
| R16A | 10461.85 | 8371.4 | 0.800184 |
| CSL8 | 5942.94 | 3921.55 | 0.659867 |
| CSL16 | 9140.57 | 5734.46 | 0.627364 |
| CAL8 | 5290.62 | 3096.09 | 0.585204 |
| GI | 1000 | 1000 | 1 |

As funções de dano relativo a edificação (porcentagem danificada de acordo com o nível de água), foram extraídas do levantamento conduzido por HUIZINGA; DE MOEL e SZEWCZYK (2017) em pesquisas de curva de cota versus dano na literatura científica disponível (Fig. 30). Utilizamos as curvas disponíveis para o tipo residencial (projetos: alto, médio e baixo padrão), tipo comercial (projetos: plano e predial) e o tipo industrial (projeto galpão). Os valores das curvas estão em formato pontual (resultado da função em alguns pontos), de forma que vamos aplicar um ajuste de curva para encontrar uma função que represente os dados apresentados.

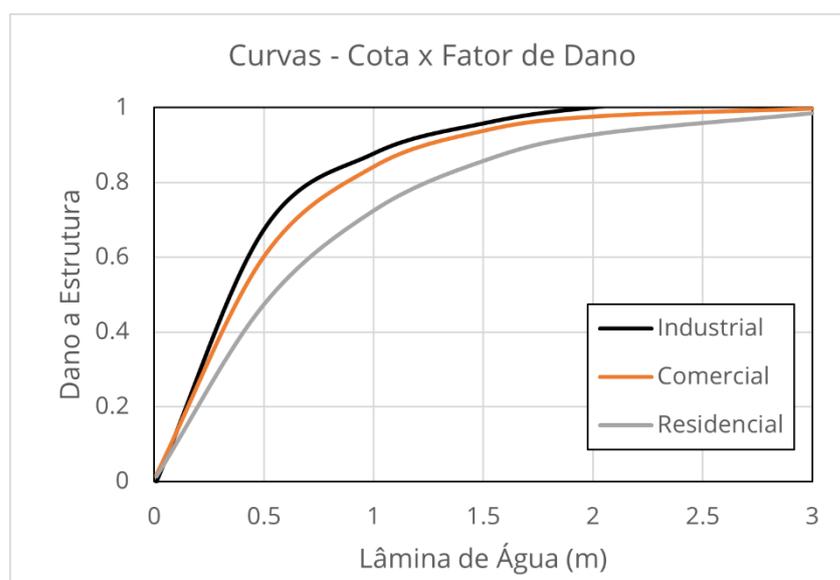


Figura 30 - Curvas que relacionam o nível de água com o total da edificação atingida (de 0 até 1). Adaptado de: HUIZINGA; DE MOEL e SZEWCZYK (2017).

Cada imóvel residencial (ou mesmo comercial e industrial), por mais que possuam um acabamento exterior parecidos, podem possuir bens internos de valores muito discrepantes, de tal modo que o procedimento ideal, é o censo em cada um dos objetos sob risco. Assim, usamos de literatura para quantificar os valores de cada empreendimento local seguindo as sugestões de (MARTÍNEZ-GOMARIZ et al., 2020). Neste sentido, usamos as curva de cota v.s. fator de dano desenvolvidas e validadas para Itajubá, Minas Gerais por NASCIMENTO et al. (2007). Ao todo usamos sete curvas de cota versus, sendo três para edificações residenciais (padrões alto, médio e baixo), e quatro para edificações comerciais/institucionais (alimentício e não alimentício, serviços escolares e serviços gerais).

Como essas curvas foram obtidas para um evento de inundação que ocorreu em janeiro de 2000, foi necessário a atualização de valores monetários. Como a maioria do conteúdo interno das edificações são produtos gerais (eletrodomésticos, móveis, alimentos, eletrônicos, decoração), utilizamos o índice de preços do consumidor amplo (IPCA) como fator de correção. Segundo o Banco Central do Brasil, no período de 01/2000 a até 05/2021, a inflação acumulou 261.3% (fator de multiplicação igual a 3.613). Após determinar os valores corrigidos, executamos também a conversão de câmbio para obter os valores em dólares.

Outro aspecto que precisa ser ajustado é a normalização das curvas de dano, já que estão com unidade em US\$/m² no eixo das ordenadas (*Figura 31 - Curvas da Fator de Dano para Conteúdos. Adaptado de Nascimento et. al. (2007)*). Considerando o valor máximo de três metros, dividimos a função pelo valor máximo, resultando em ordenadas de 0 a 1. O valor máximo por metro quadrado será também multiplicado pelo valor da área das edificações (segundo sua categoria), chegando assim no valor máximo potencial de dano (Eq. 9). Assim, temos o valor de dano ao conteúdo das construções.

$$P_{con} = (P_{i,max} \cdot A) \cdot F(h) \quad (9)$$

Onde $P_{i,max}$ é o valor máximo de dano em potencial (R\$/m²), A é a área da edificação, e $F(h)$ é a curva de dano relativo, dependente do valor da altura de lâmina de água.

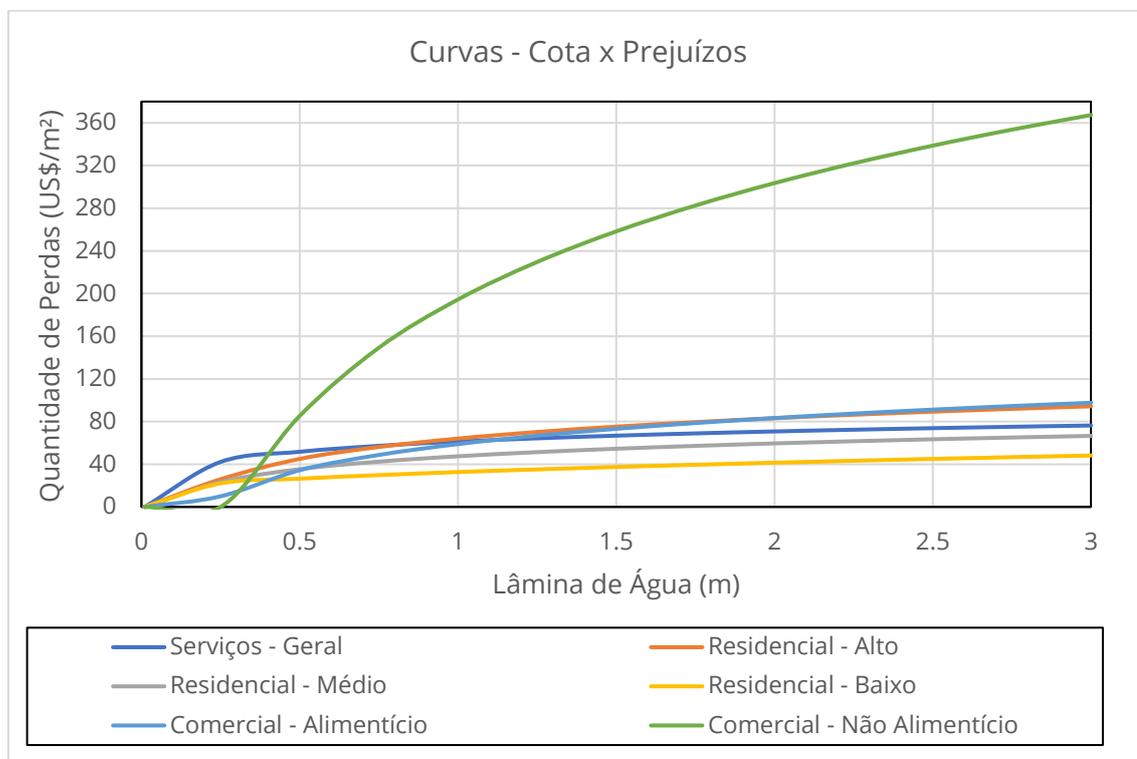


Figura 31 - Curvas da Fator de Dano para Conteúdos. Adaptado de Nascimento et. al. (2007)

2.6 Cenários de Avaliação

Para averiguar os diferentes efeitos das mudanças na bacia hidrográfica, bem como o impacto econômico, realizamos simulações hidrológicas-hidráulicas (2D) juntamente com a análise de danos econômicos. Estas simulações estão vinculadas a cenários hipotéticos listados na Tab. 1, de modo que reflita as proposições discutidas anteriormente.

As simulações de fluxo foram realizadas de maneira acoplada, com os pacotes de uso livre HEC-HMS e HEC-RAS, de propriedade da USACE. O HMS (*Hydrologic Modelling System*) possui capacidades para transformar eventos de precipitação em escoamento efetivo, que é conduzido aos canais de macrodrenagem. Quando a água passa a correr nestes canais, entra em ação o RAS (*River Analysis System*), que utiliza as equações 2D de Saint-Venant para encaminhar a vazão até o ponto exutório da bacia.

Os cenários têm por base duas configurações de terreno da bacia, com nomes “Prosa_2016” e “Prosa_2019”. Na primeira malha temos a presença do assoreamento total dos lagos de contenção do Parque dos Poderes, bem como a falta de uma barragem de proteção, que ainda não havia sido executada. Por outro lado, na segunda malha temos a presença da barragem do Parque Ecológico, bem como a batimetria dos lagos de contenção pós dragagem dos sedimentos.

Para a precipitação, utilizamos quatro amostras, baseadas em chuvas de projeto com diferentes tempos de retorno. Estas chuvas foram desenvolvidas com base na equação IDF do município de Campo Grande, para uma duração de 1h30min, distribuída com o método linear exponencial (geometricamente característico da bacia). Os tempos de retorno avaliados foram 5, 10, 50 e 100 anos. O evento de 5 anos foi selecionado como o padrão para avaliar as mudanças de cenários estruturais, pela maior probabilidade de ocorrência.

A [Tabela 9](#) organiza os diferentes cenários utilizado para análises de custo e implantação. Cada simulação recebeu um número identificador (ID) e um nome, além de estar conectada a uma geometria (configurações de terreno), bem como um evento de precipitação. Na guia descrição, mais detalhes sobre o cenário correspondente.

Tabela 9 - Cenários de inundação simulados, utilizados para a avaliação. Elaborado pelos autores.

| ID | Nome do Cenário | Terreno | Chuva | Observação |
|-----------|------------------------|----------------|--------------|--|
| 1 | C5_2019 | Prosa_2019 | TR = 5 | Chuva de 5 anos, na configuração atual |
| 2 | C10_2019 | Prosa_2019 | TR = 10 | Chuva de 10 anos, na configuração atual |
| 3 | C50_2019 | Prosa_2019 | TR = 50 | Chuva de 50 anos, na configuração atual |
| 4 | C100_2019 | Prosa_2019 | TR = 100 | Chuva de 100 anos, na configuração atual |
| 5 | C5_2016 | Prosa_2016 | TR = 5 | Chuva de 5 anos sem as últimas obras. |
| 6 | C5_2016_5B | Prosa_2016 | TR = 5 | Chuva de 5 anos, em 2016 sem a presença de |

| | | | | |
|---|-------------|------------|--------|---|
| | | | | uma barragem. |
| 7 | C5_2016_0B | Prosa_2016 | TR = 5 | Chuva de 5 anos, em 2016 sem a presença de todas as barragens. |
| 8 | C5_2019_OTM | Prosa_2019 | TR = 5 | Chuva de 5 anos, atualmente, com a otimização de uso dos lagos. |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Histórica

Observamos que as inundações na Bacia do Prosa é um problema antigo, onde desde os anos 80 já temos relatos de transbordamento da calha do Prosa, nas proximidades da região central do município. Nesta época, novos empreendimentos na área atuaram como vetor de crescimento, estimulando o aumento populacional, atraindo pessoas e conseqüentemente a urbanização dos loteamentos recém-criados. Os vetores incluíram a implantação das sedes do poder público estadual, parques turísticos e o primeiro shopping do estado.

O crescimento populacional também motivou a ocupação de áreas de risco, como as margens do córrego Sóter (com aglomerados de barracos, no estilo de favela – Fig. 8) até o início dos anos 2000, onde projetos de implantação de vias e adequação urbanística forçaram a retirada destas pessoas, liberando o entorno do córrego para a recuperação de sua mata ciliar (Figura 32). No censo demográfico do IBGE de 2000, a população na bacia do Prosa era de 58495 habitantes (cerca de 8.8% do total municipal).



Figura 32 - Urbanização das margens do córrego Sóter. Imagem de satélite de 2002 (a esquerda) e 2006 (a direita). Imagens proprietárias do Google.

O risco de inundações chegou a patamares críticos a partir do ano de 2005, onde cheias afetaram sucessivamente as regiões que hoje são pontos recorrentes de inundação (Figura 26 - Pontos de inundação recorrente na bacia hidrográfica do córrego Prosa. Marcações com os nomes dos logradouros atingidos. Elaborado pelos autores.), com grande repercussão midiática. Isso levou a prefeitura a tentar criar medidas para tentar solucionar o problema, e obras foram realizadas neste intuito. Estas medidas estão no grupo estruturais, englobando obras de engenharia hidráulica como barragens e reservatórios em rede/laterais, com o intuito de promover o achatamento dos hidrogramas (Figura 33).



Figura 33 - Obras de proteção contra inundações implantadas em Campo Grande, na bacia do Prosa. Temos na figura 1 a construção do piscinão (imagem de 2009 a esquerda e 2013 a direita), 2 a escavação dos lagos de contenção (imagem de 2006 a esquerda e 2013 a direita) e no 3, a edificação das barragens (imagem de 2006 na esquerda e 2013 na direita). Imagens proprietárias do Google.

As obras foram executadas no período de 2009 a 2013. Durante este período, novos eventos de inundação causaram transtornos à população (inclusive danificando os canteiros das obras de drenagem), já levantando a dúvida sobre a efetividade que estas intervenções poderiam ter no futuro (de acordo com as entrevistas veiculadas pelas mídias locais). O censo demográfico de 2010, indicou o aumento da população na área, de 82328 habitantes (40.8% a mais, em uma década).

Os eventos de inundação após 2013 demonstraram que as obras não foram suficientes para sanar o problema. Neste ponto, a cidade registrava quase um evento por ano, e para enfrentar esta situação, foi consolidado um plano diretor de drenagem urbana, com estudos detalhados e alternativas pré dimensionadas para cada região da cidade (PMCG, 2015). A bacia do Prosa recebeu neste plano um diferencial em relação as outras bacias no município, com planos de implantação de alternativas estruturais para tentar minimizar as inundações, com foco principalmente em estruturas de retenção e armazenamento de volume. Logo no ano seguinte ao Plano Diretor, em 2016, algumas medidas mencionadas nos estudos do Prosa já começaram a ser implementadas, incluindo a construção de mais uma barragem e tanques de retenção em áreas da cabeceira, mas poucas foram finalizadas.

Em 2018 e 2019, voltam a ocorrer inundações nos pontos recorrentes, e aqui, os tomadores de decisão locais já tentam mudar de pensamento, começando a tomar novas iniciativas junto à população. Temos a incluindo de audiências públicas, trazendo à mesa de debate membros da comunidade acadêmica, objetivando o desenvolvimento de novas soluções, que possam resolver ou mitigar os transtornos.

3.2 Análise de medidas estruturais de Controle de Cheias

Modelando um evento de 5 anos de tempo de retorno, para a geometria de 2016 (barragens implantadas e operacionais – cenário ID 5, [Tabela 9](#)), e comparando para o mesmo cenário sem a presença das obras (cenário ID 7), identificamos que na região da Via Parque ([Figura 26](#) - Pontos de inundação recorrente na bacia hidrográfica do córrego Prosa. Marcações com os nomes dos logradouros atingidos. Elaborado pelos autores.), tendo como seção de avaliação a saída do piscinão, vazão máxima de 75.19 m³/s (ID 5), contra 88.57 m³/s (ID 7). Aqui, a presença das obras reduziu o pico do hidrograma em 15.11% ([Figura 34](#) - Hidrogramas para o evento de TR = 5 anos, localizados antes da confluência do Sóter e Prosa (A) e depois da confluência (B). Elaborado pelos autores.).

Para os mesmos cenários de inundação, mas considerando apenas a influência do córrego Sóter (seção de avaliação antes da junção com o córrego

Prosa), vemos que as barragens também contribuíram para um atraso do tempo de pico, de 12 minutos, bem como mudou o formato do hidrograma, que passou a possuir patamares (Figura 34).

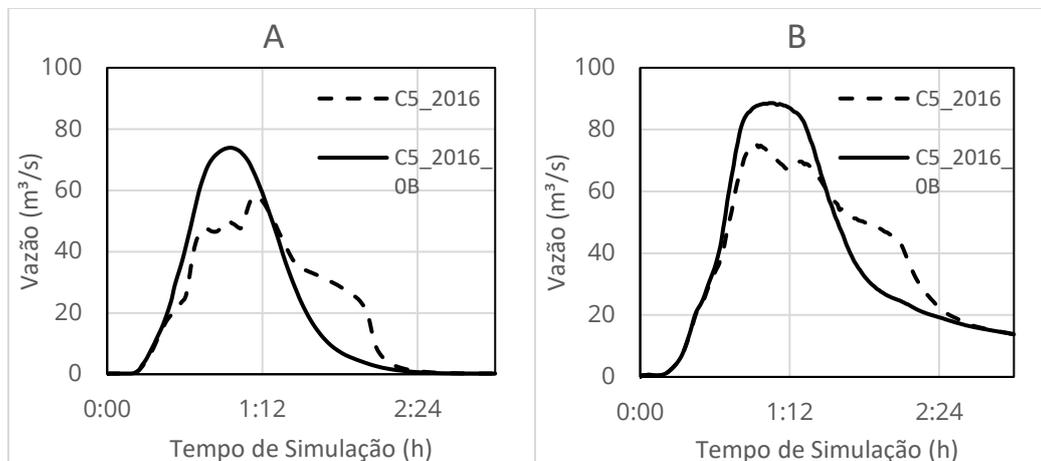


Figura 34 - Hidrogramas para o evento de TR = 5 anos, localizados antes da confluência do Sóter e Prosa (A) e depois da confluência (B). Elaborado pelos autores.

Também se verificou que a inundação causada pelo evento de TR = 5 anos sem a presença da série de barragens, é suficiente para causar na região da Via Parque, a mesma cota de cheia de um evento TR = 100 anos, na configuração atual da bacia, já que a vazão de pico na saída do piscinão para o evento (ID 4) é de 88.59 m³/s. Curiosamente, este comportamento não é encontrado nas áreas a jusante, provavelmente devido ao amortecimento e redução da velocidade do fluxo na área do Parque Ecológico do Prosa.

Quanto aos lagos de retenção implantados no Parque das Nações Indígenas, a modelagem indica pouco ou nenhum efeito sobre o pico dos hidrogramas a jusante da confluência dos córregos Sóter e Prosa. Verificando os hidrogramas do evento TR = 5 anos com e sem este reservatório (ID 1 e 5 – Tabela 9), temos apenas uma pequena redução do pico (0.2% menor) e transladação do hidrograma com o reservatório, atrasando o pico em 2 minutos.

Nas regiões de jusante (Av. Ricardo Brandão – Figura 26), o acréscimo de escoamento superficial (devido a maior impermeabilização do solo dos bairros centrais), induz inundações em todos os cenários pesquisados. Uma barragem extra foi construída no final de 2016, dentro do Parque Ecológico do Prosa, com o objetivo de minimizar as inundações na avenida, e segundo nossas modelagens (comparação dos IDs 1 e 5), há uma contribuição na redução do pico do

hidrograma no exutório do estudo, da ordem de $5.73\text{m}^3/\text{s}$ (5.82%), bem como um atraso do tempo de pico, de 3 minutos (Figura 35). Ainda no nosso exutório, ao verificar o impacto das medidas como um todo (comparação dos eventos IDs 1 e 7), vemos uma atenuação da vazão de $13.14\text{m}^3/\text{s}$, ou 12.42% menor do que sem as obras de mitigação (Figura 35).

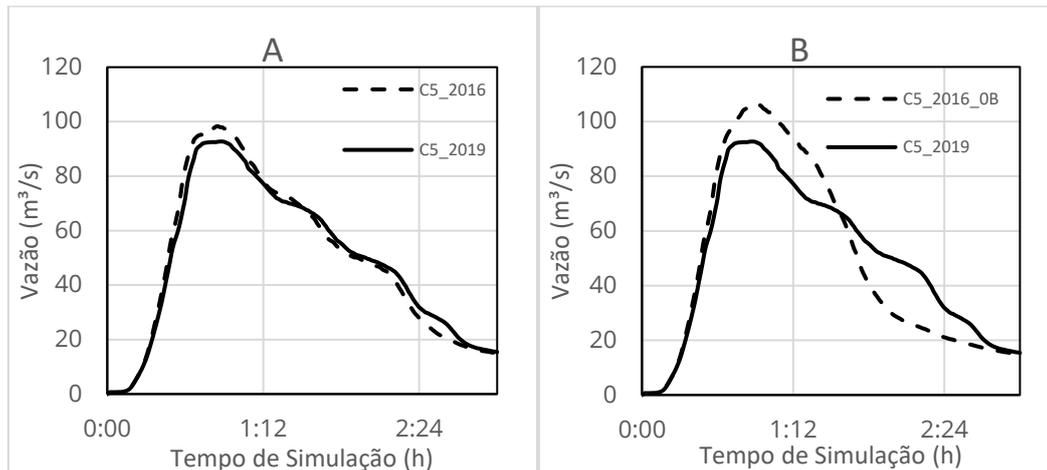


Figura 35 - Comparação de hidrogramas na região do exutório. Em A, temos a comparação para TR = 5 anos com e sem a barragem extra. Em B, temos a comparação de todas as medidas versus sem nenhuma. Elaborado pelos autores.

Nota-se que a população residente na bacia possui conhecimento (mesmo que empírico) do que causa as inundações, e isso é fator determinante para cada vez mais aumentar a resiliência contra estes fenômenos. Na Av. Ricardo Brandão por exemplo, muitos empreendimentos a partir de 2006 já apresentem características construtivas que diminuem o risco de submersão (Figura 36), como fundações altas (principalmente taludes de terra), e posicionamento de edificações o mais longe possível da avenida. Segundo as simulações hidrodinâmicas as lâminas de água, já com eventos de TR = 5 anos, algumas destas edificações se tornam vulneráveis as inundações, atingindo a totalidade com TR = 50 anos.



Figura 36 - Exemplo de adaptação das construções nas áreas vulneráveis. Fundações mais altas que o nível da calçada. Dos autores.

3.3 Avaliação de Danos Econômicos

Com a extensão e profundidade de inundação modelados e nosso modelo de danos configurado, podemos estimar o dano causado as edificações, partindo da hipótese que o dano começa a ser contabilizado a partir do momento que a água atinge a altura do piso térreo das construções (Figura 37). Considerando os eventos para a última geometria (ID 1, 2, 3 e 4), para a área de estudo hidráulica há prejuízos materiais significativos para chuvas com tempo de retorno de até 5 anos de US\$ 15.76 mil, e com um TR=10, temos dano estimado de US\$ 83.03 mil para o conjunto de classificações. Agravando a precipitação, com TR = 50 anos, temos um aumento dramático dos prejuízos, da ordem 461% maior, chegando a mais de 382 mil dólares americanos. Por fim, com uma chuva catastrófica de TR=100 anos, temos danos materiais acima de 479 mil dólares (578% a mais que a chuva de 0.1% de probabilidade).

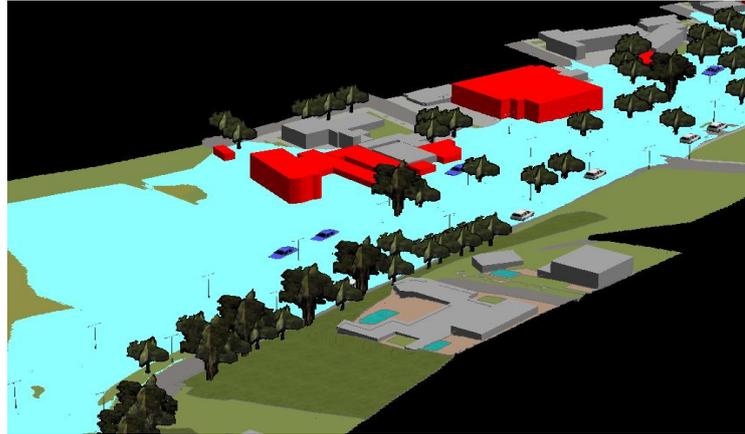


Figura 37 - Vista 3D para as edificações atingidas (segundo o modelo de danos), para a região do exutório (Av. Ricardo Brandão), para TR = 100 anos. Elaborado pelos autores.

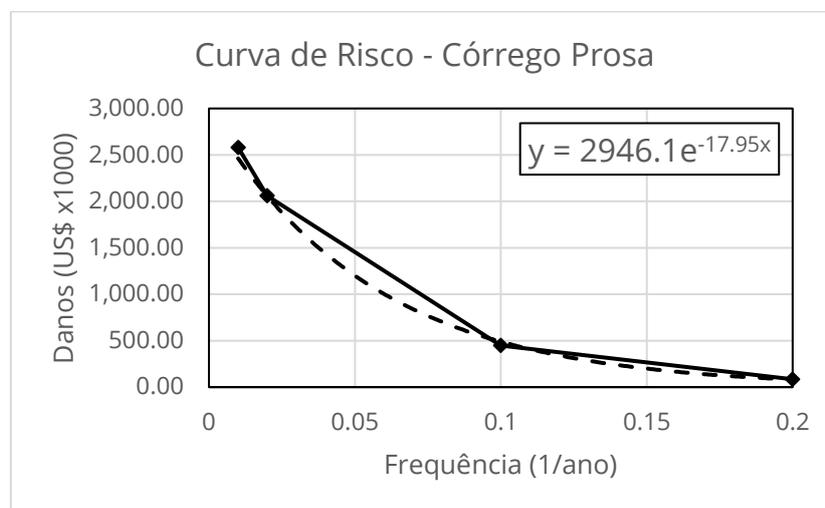


Figura 38 - Curva de danos versus frequência, para o córrego Prosa. Elaborado pelos autores.

O alto prejuízo de conteúdos de edificações, pode ser explicado ao analisar os tipos de estruturas mais vulneráveis nas áreas de risco, que incluem concessionárias de veículos, além de mecânicas, escritórios e depósitos de produtos (a maioria presente na região da Av. Ricardo Brandão).

Apesar do valor de conteúdo de edificações ser preponderante na somatória de danos, nota-se que em comparação aos produtos vendidos, os valores determinados parecem subestimados, principalmente em relação a classe comercial. Isso pode ter ocorrido devido a incompatibilidade da tipologia de objetos levados em conta na construção das curvas, já que a cidade onde os dados foram levantados (na época) é pequena, com comércio varejista simples com mercadorias menos valiosas, reforçando a necessidade de determinação de curvas de nível versus prejuízo para a localidade.

A presença das medidas de proteção tem papel fundamental nos números calculados pelo HEC-FIA. Simulando o dano causado pelo evento de 5 anos, sem as medidas de proteção (ID 7), temos um valor estimado de US\$ 21,712.94, cerca de 27.4% a mais do que com a presença das barragens e reservatórios (ID 2).

De acordo com relatório do TCU (Tribunal de Contas da União), o custo das obras executadas na bacia do Prosa (referidas no item 3.1), corrigido para o tempo atual com base na inflação e convertendo em dólares americanos (cotação de 02/03/2021), foi de US\$ 9,589,885.43 (apenas de recursos federais, com finalidade atribuída). Com base neste valor e na diferença de prejuízos nos cenários com e sem medidas de proteção para um TR = 5 anos, vemos que foram gastos cerca 349.99 mil dólares americanos para cada 1% de redução de danos na área de estudo.

Vemos que a necessidade deste tipo de estudo é de grande valia para aferição do custo-benefício de medidas de proteção. Estudos como este também podem trazer informações para a previsão de alocação de recursos de emergência, utilizados para a o apoio imediato e reconstrução de áreas afetadas. Seguradoras por exemplo podem incluir os modelos socioeconômicos nas tradicionais abordagens topográficas e hidrológicas para melhorar as análises de aptidão de sinistros.

Tomadores de decisão do poder público também podem tirar proveito deste tipo de estudo. Em Campo Grande por exemplo, imóveis que porventura foram acometidos por inundações estão isentos de pagamento do Imposto Patrimonial Territorial Urbano (PMCG, 2015), de forma que identificar para eventos futuros quais lotes poderão requerer este benefício pode facilitar o manejo dos recursos. Vale ressaltar que este dispositivo legal também já foi implantado anteriormente em outras cidades brasileiras, a exemplo de São Paulo (PMSP, 2007) e Ribeirão Preto (PMRP, 2005).

Assim como descrito por MOKHTARI; SOLTANI e MOUSAVI (2017), este tipo de modelagem possui limitações quanto ao grau de detalhamento aplicado aos estudos, bem como a qualidade dos dados empregados, já que as incertezas ao longo do processo de modelagem são

propagados aos modelos. As principais fontes de incerteza para este tipo de estudo são: modelo digital de terreno (cotas de cheia são conectadas as cotas do terreno) e curvas de dano (validação de curvas requer grandes volumes de dados, difíceis de serem obtidos).

3.4 Relações de Interferência na Bacia do Prosa

Ao analisar as entidades presentes na bacia, vemos uma rede ampla de relações, positivas e negativas, que vem determinando o manejo de inundações na bacia. Vimos nos resultados anteriores que as medidas até agora adotadas surtiram efeito (principalmente as barragens), mas não o suficiente para gerar segurança contínua aos presentes nas áreas vulneráveis, além da fraca eficiência econômica das medidas tradicionais é aquém a demandada, custando muito e entregando pouca diferença nos cenários de inundação.

Uma vez que não há elementos que oneram as características físicas das medidas adotadas, temos que a rápida urbanização das regiões de cabeceira, aliado ao transporte de sedimentos (com contribuição direta das construções que enchem a micro drenagem de areia e detritos) são os grandes vilões que impedem o bom funcionamento da drenagem da bacia. Uma vez sabido que a urbanização é um processo natural do desenvolvimento humano (CHEN; WANG; LI, 2020), que precisa de um ambiente confortável para obter plena qualidade de vida, o que podemos fazer para contornar este problema?

Com base na descrição do histórico, podemos perceber um padrão de inundações (Figura 39), geralmente seguido de insatisfação da população, a cada vez que cenas como das vias submersas estampam as manchetes dos noticiários locais. Vemos que conforme a urbanização na bacia avança, obras públicas são planejadas e executadas, e quando parece que o problema vai ser resolvido, vem outra chuva, sobrepuja a capacidade de drenagem, e repete tudo novamente.

Dentre as potencialidades para a quebra deste ciclo, estudos detalhados e personalizados (como visto no plano diretor), devem ser executados em sua integralidade, seguido de fiscalização. Ações complementares também podem ajudar no processo de mitigação, como por exemplo, as medidas individuais de inundação, onde NOFAL e LINDT (2020) concluíram que estas possuem uma

efetividade excelente para o controle de inundações (em alguns casos melhor que medidas comunitárias), mas que dependem de projeto e implantação correta por parte das famílias e comerciantes, que precisam de instrução.

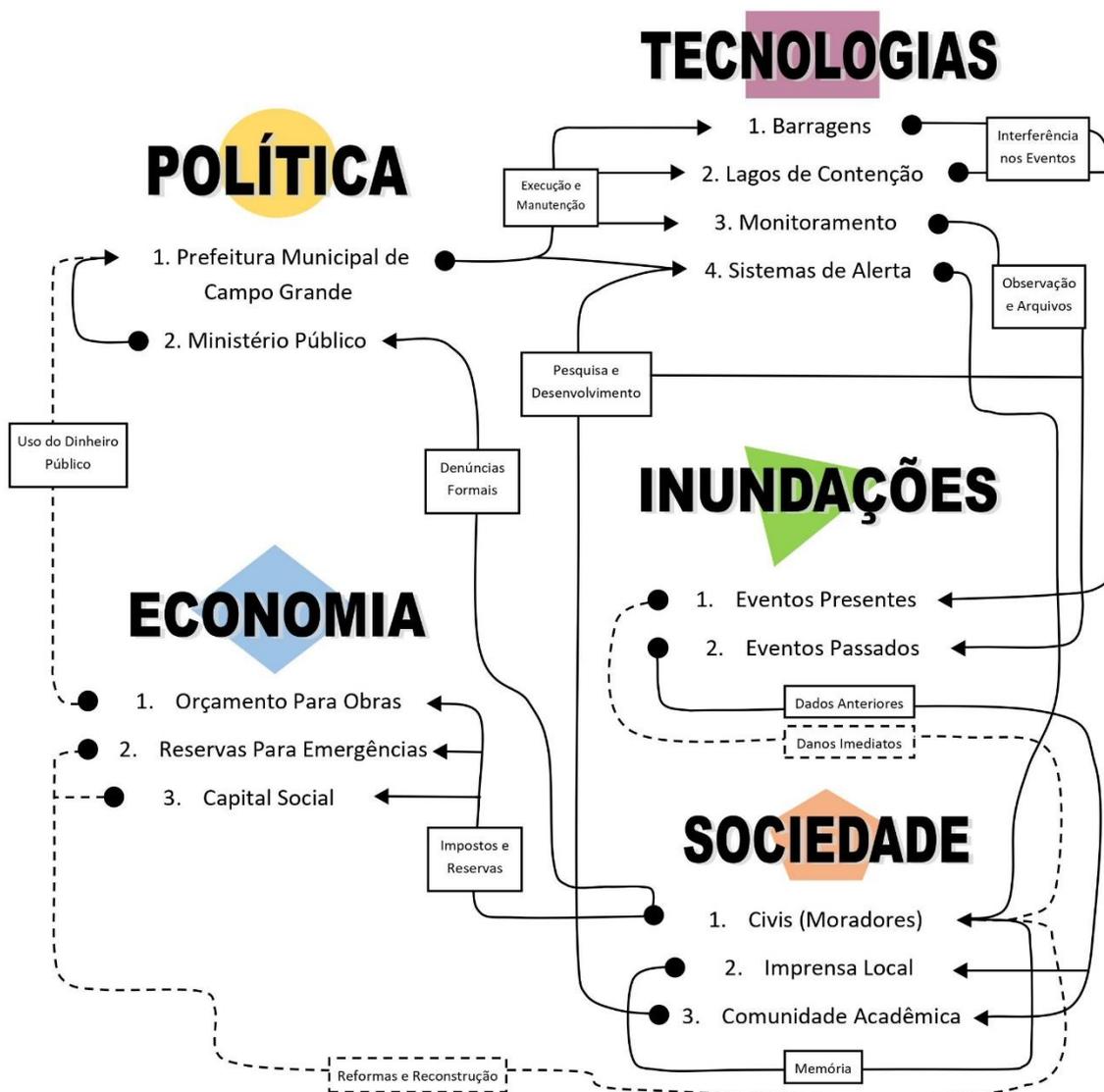


Figura 39 - Conexões de causa e consequência para os diferentes elementos que compõem a bacia do Prosa. Elaborado pelos autores.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo avaliamos inundações na bacia hidrográfica do Prosa, em relação as interações com a sociedade e quanto aos aspectos econômicos. No âmbito social, foi discutido o histórico dos eventos, bem como as medidas que foram sendo

adotadas ao longo do tempo, junto com os resultados. No final, podemos concluir que:

- a) Há mais de 50 anos a bacia do Prosa tem consolidado sua posição como área propensa a inundações, e uma sucessiva implantação de medidas convencionais se mostraram ineficientes para conter o problema, levando a população a expandir as discussões para tentar encontrar novas soluções;
- b) Dentre as medidas adotadas, a que mais gerou resultados foram as barragens de contenção, que atuam na bacia de maneira a armazenar uma porção do volume que escoar superficialmente. Para um cenário de chuva com TR = 5 anos, temos uma redução de aproximadamente 15%;
- c) Reservatórios em rede construídos não alteraram o pico dos hidrogramas de maneira sensível, mas contribuem com a transladação dos hidrogramas, e com a deposição de sedimentos (requerendo manutenção regularmente);
- d) Medidas de proteção individual possuem papel no aumento da resiliência da área ante os eventos de inundação, com algumas edificações já sensibilizadas com chuvas a partir de tempo de retorno igual a 10 anos;
- e) Eventos de inundação no Prosa podem gerar prejuízos de até 479 mil dólares (TR = 100 anos), sendo que para cenários de comparação das medidas de contenção (TR = 5 anos), vimos que houve redução de 27.4% nos danos potenciais modelados;
- f) O valor dos prejuízos gerados pelas inundações está subestimado devido as diferenças dos dados obtidos na determinação das curvas nível versus prejuízo e as edificações encontradas na bacia do Prosa (principalmente as edificações comerciais);
- g) Segurança contra inundações a longo prazo nesta bacia pode ser alcançada, mas dependerá do uso de tecnologias específicas e deve ser debatida com a população, para propiciar um ambiente ótimo onde as medidas poderão ter máxima eficiência.

5. REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-2:**

Avaliação de bens Parte 2: Imóveis Urbanos, 2011. .

AWAD, M. M. C. **Valores de edificações de imóveis urbanos 2017**. [s.l: s.n.].

CAROLINA, A. et al. Using historical source data to understand urban flood risk : a socio-hydrological modelling application at Gregório Creek , Brazil.

Hydrological Sciences Journal, v. 65, n. 7, p. 1075–1083, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1740705>>.

CHEN, J.; WANG, L.; LI, Y. Natural resources, urbanization and regional innovation capabilities. **Resources Policy**, v. 66, n. January, p. 101643, 2020.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101643>>.

DI BALDASSARRE, G. et al. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 8, p. 3295–3303, 2013.

FROTA, R. L. et al. “ Network ” socio-hydrology : a case study of causal factors that shape the Jaguaribe River Basin ., **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 6, p. 935–950, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1913282>>.

GONCALVES, M. L. R. et al. Modeling the Effects of Introducing Low Impact Development in a Tropical City : A Case Study from. 2018.

HANKIN, B. et al. How can we plan resilient systems of nature-based mitigation measures in larger catchments for flood risk reduction now and in the future?

Water Security, v. 13, n. April, p. 100091, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100091>>.

HUIZINGA, J.; DE MOEL, H.; SZEWCZYK, W. **Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines**. [s.l: s.n.]

MARTÍNEZ-GOMARIZ, E. et al. Flood depth-damage curves for Spanish urban areas. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

MATTOS, T. S. **Improving urban flood resilience**. 2021. UFMS, 2021.

Disponível em:

<https://repositorio.ufms.br/bitstream/123456789/3702/1/Tese_Corrigida.pdf>.

MERZ, B. et al. Assessment of Economic Flood Damage. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 10, n. 8, p. 1697–1724, 2010.

MOKHTARI, F.; SOLTANI, S.; MOUSAVI, S. A. Assessment of Flood Damage on Humans, Infrastructure, and Agriculture in the Ghamsar Watershed Using HEC-FIA Software . **Natural Hazards Review**, v. 18, n. 3, p. 04017006, 2017.

MONDAL, M. S. H.; MURAYAMA, T.; NISHIKIZAWA, S. Examining the determinants of flood risk mitigation measures at the household level in Bangladesh. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 64, n. July, p. 102492, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102492>>.

NAGEM, F. R. M. **Avaliação Econômica Dos Prejuízos Causados Pelas Cheias Urbanas**. 2008. 2008. Disponível em: <<http://plutao.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/06.21.18.22.16/doc/Leonardo%2520B.%2520L.%25> <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2008-2/1496-fernanda-raquel-maximiano-nagem-mestrado/file>>.

NASCIMENTO, N. et al. The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. **Urban Water Journal**, v. 4, n. 3, p. 195–210, 2007.

NOFAL, O. M.; LINDT, J. W. Van De. International Journal of Disaster Risk Reduction High-resolution approach to quantify the impact of building-level flood risk mitigation and adaptation measures on flood losses at the community-level. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 51, n. July, p. 101903, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101903>>.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

PESSINA, G. de L. **ANÁLISE DE RISCO DE INUNDAÇÕES EM TERMOS DE PREJUÍZOS GERADOS NA PRESENÇA DE EVENTOS MAIS CRÍTICOS QUE O DEFINIDO EM PROJETO: APLICAÇÃO AO RIO IGUAÇU - BAIXADA FLUMINENSE / RJ**. 2014. 2014.

PMRP, P. M. de R. P. **Lei 1888/05**, 2005. .

PMSP, P. M. de S. P. **Lei 14493/07**, 2007. .

SALGADO, J. C. M. **Avaliação Econômico de Projetos de Drenagem e de Controle de Inundações em Bacias Urbanas**. 1995. 1995.

SCHLÖGL, M. et al. Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. **Climate Risk Management**, v. 32, n. February, 2021.

SHIH, S.; KUO, P.; LAI, J. A nonstructural flood prevention measure for mitigating urban inundation impacts along with river flooding effects. **Journal of Environmental Management**, v. 251, n. September, p. 109553, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109553>>.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 8, p. 1270–1276, 2012.

VANELLI, F. M.; KOBAYAMA, M. Situação Atual Da Socio-Hidrologia No Mundo E No Brasil. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS**, n. January, p. 1–10, 2020.