

Estudo comparativo entre a aplicação de conceitos de drenagem convencional e de técnicas de amortecimento de vazões em um caso real

Comparative study between the application of conventional drainage concepts and flow damping techniques in a real case

Leonardo Leon Leite Moreira¹ , Daniel Jadyr Leite Costa² 

Citação: Moreira, L. L. L. & Costa, D. J. L. Antunes, D. C.; Tavares, A. T. & Miranda, D. O. (2025).

Estudo comparativo entre a aplicação de conceitos de drenagem convencional e de técnicas de amortecimento de vazões em um caso real. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 10, e025005
<https://doi.org/10.18554/rbcti.v10i00.8541>

Recebido: 26 abr. 2024

Aceito: 02 dez. 2025

Publicado: 30 dez. 2025



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. Universidade Federal de São Carlos,  Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, São Carlos (SP), Brasil.

*Autor para correspondência: danielcosta.geo@gmail.com

RESUMO: O crescimento urbano desordenado tem provocado alterações significativas no meio físico, especialmente o aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização das superfícies. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho técnico e econômico de soluções de drenagem urbana no bairro Igrejinha, em Juiz de Fora - MG, por meio de simulações hidrológicas utilizando o software Storm Water Management Model (SWMM 5.2). Foram desenvolvidos três cenários de modelagem: situação atual, drenagem convencional e drenagem sustentável (com bacias de detenção abertas e gramadas). Os resultados indicaram que o modelo sustentável reduziu em 20,5% a vazão máxima no ponto de saída (01) em relação à condição atual, enquanto o modelo convencional apresentou aumento de 24%. Em termos econômicos, observou-se redução de 12% nos custos de implantação das soluções sustentáveis, embora os custos de manutenção sejam 32% superiores. Conclui-se que a adoção combinada de soluções convencionais e sustentáveis é mais eficiente técnica e ambientalmente, contribuindo para a mitigação de cheias urbanas e para o planejamento de sistemas de macrodrenagem mais resilientes.

Palavras-chave: Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável. Modelagem Hidrológica. *Storm Water Management Model (SWMM)*. Estimativas de Custo.

ABSTRACT: Unplanned urban growth has caused significant changes in the physical environment, especially the increase in surface runoff due to the impermeabilization of urban areas. This study aims to evaluate the technical and economic performance of urban drainage solutions in the Igrejinha neighborhood, Juiz de Fora - MG (Brazil), through hydrological simulations using the Storm Water Management Model (SWMM 5.2). Three modeling scenarios were developed: current situation, conventional drainage, and sustainable drainage (with open and grassed detention basins). The results showed that the sustainable model reduced the maximum outflow by 20.5% compared to the current condition, while the conventional model increased it by 24%. Economically, the sustainable solutions presented a 12% lower implementation cost, although maintenance costs were 32% higher. It is concluded that combining conventional and sustainable solutions provides greater technical and environmental efficiency, contributing to flood mitigation and to the planning of more resilient urban drainage systems.

Keywords: Sustainable Urban Drainage Systems. Hydrological Modeling. *Storm Water Management Model (SWMM)*. Cost Estimates.

1. Introdução

Desde o surgimento das cidades, seu desenvolvimento tem se baseado na modificação do meio físico, sem considerar os aspectos naturais existentes, como o relevo, a vegetação e o fluxo natural das águas, prejudicando a qualidade de vida das próprias populações (Silva, 2020). No Brasil, como na maioria dos países em desenvolvimento, o processo de urbanização nas últimas décadas tem sido desregulado, com impactos significativos nas bacias hidrográficas (França et al., 2022).

No passado, a regra geral era drenar as chuvas urbanas para canais e cursos d'água o mais rápido possível, transferindo o impacto para áreas mais a jusante, princípio da drenagem convencional. No entanto, a partir da década de 1970, diversos países desenvolvidos começaram a observar aspectos insustentáveis do desenvolvimento urbano expansivo. Com o avanço dos estudos e observações, na década de 90 esses países passaram a propor medidas voltadas à restauração das condições naturais das bacias por meio de dispositivos que promovam retenção e infiltração, iniciando assim a aplicação de técnicas de drenagem urbana mais sustentáveis (Baptista et al., 2015).

As mudanças climáticas têm impactado significativamente diversas áreas do conhecimento, sendo a hidrologia uma das mais afetadas. Por exemplo, as mudanças climáticas aumentaram o risco de falhas na infraestrutura hidráulica existente, o que requer adaptações para garantir a segurança das comunidades atendidas (Carneiro et al., 2022). Em seu estudo, Carneiro et al. (2022) discutem que as curvas IDF projetadas para o futuro da área de estudo apresentam grandes variações nos níveis de precipitação devido a imprecisões e incertezas nos modelos de previsão climática global. Para mitigar esses efeitos, os autores recomendam que os impactos das mudanças climáticas sejam considerados nas fases de planejamento, projeto, operação e manutenção dessas infraestruturas.

Diante do cenário atual de crescentes mudanças no ambiente urbano, como a impermeabilização do solo e a degradação dos recursos hídricos, torna-se essencial e urgente repensar a forma como as águas urbanas são geridas, buscando promover a implementação de medidas mais sustentáveis (Caparrós-Martínes et al., 2020).

Nesse sentido, surgiram alguns conceitos voltados para uma drenagem mais sustentável e natural, levando em consideração tanto a quantidade de água drenada quanto a qualidade desse escoamento superficial. Em locais mais desenvolvidos, como América do Norte e Europa, essa questão ganhou destaque, recebendo outros nomes como Boas Práticas de Gestão, Desenvolvimento de Baixo Impacto, Técnicas Compensatórias e Sistema de Drenagem Urbana Sustentável - SUDS (Silva, 2020; Ferrans, 2022).

Em linhas gerais, estes conceitos mais sustentáveis do manejo das águas pluviais urbanas visam restaurar o ciclo hidrológico natural anterior ao processo de urbanização de uma área, promovendo melhorias não apenas quantitativas, mas também qualitativas, como a redução do nível de sólidos em suspensão e poluentes, o que proporciona uma melhoria na qualidade dessas águas pluviais (Ximena, 2021). Essas estruturas proporcionam benefícios ambientais de longo prazo, contribuem para a redução dos impactos das mudanças climáticas e afetam questões ecológicas e sociais (Tang et al., 2021; Zhu et al., 2019).

Em complemento aos benefícios das técnicas sustentáveis, como o SUDS, Alves et al. (2022) apontam que há certa tendência de implantação SUDS em áreas com infraestrutura urbana já instalada e parcialmente adequada, bem como em áreas não consolidadas, o que facilita o acesso à disponibilidade de espaço e a integração com o planejamento urbano no desenho da região.

No entanto, a seleção, a localização e o dimensionamento de instalações SUDS envolvem um alto grau de complexidade, que depende de ferramentas que ajudem a representar os sistemas de drenagem e sejam sistematicamente alimentadas com informações relevantes. Em bacias hidrográficas urbanas complexas e ocupadas, a modelagem hidrológica é essencial para prever o comportamento do sistema de drenagem local na implementação de dispositivos SUDS e para avaliar os impactos gerados em todo o sistema urbano (Ferrans et al., 2022).

Em termos gerais, os modelos hidrológicos representam uma série de bacias hidrográficas e seus respectivos parâmetros nos quais a precipitação é convertida em vazão. As sub-bacias em estudo atuam como uma espécie de reservatório não linear, onde a vazão de descarga no sistema é obtida através do

balanço entre o volume precipitado e as porções infiltrada, evaporada, armazenada e drenada. A vazão gerada é obtida utilizando as equações de Manning e de continuidade, na maioria dos casos (Pontes et al., 2021).

Para este trabalho, foi utilizado o software de modelagem Storm Water Management Model (SWMM), versão 5.2, um modelo computacional amplamente utilizado para análise e simulação de sistemas de drenagem urbana. Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), o SWMM foi projetado para auxiliar engenheiros e planejadores na compreensão e gestão do comportamento hidrológico em áreas urbanas (Santos et al., 2021; Ferrans et al., 2022). Em pesquisas recentes, este software tem se mostrado uma ferramenta importante para o projeto de sistemas de drenagem mais sustentáveis, onde é possível simular o impacto quantitativo e qualitativo do escoamento gerado em bacias hidrográficas urbanas (França et al., 2022).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo simular cenários hidrológicos utilizando o software SWMM 5.2, aplicando conceitos voltados às técnicas de drenagem convencional e técnicas sustentáveis de drenagem urbana (SUDS), como as bacias de detenção.

O estudo foi desenvolvido no bairro Igrejinha, localizado no município de Juiz de Fora - MG, área que apresenta constantes problemas de inundações e vem enfrentando desafios relacionados ao crescimento urbano desordenado e à insuficiência de infraestrutura de macrodrenagem. A escolha da área de estudo justifica-se por diversos fatores: a recorrência de inundações; a priorização secundária por parte do poder público, em função da escassez de recursos e da existência de áreas mais afetadas; a vulnerabilidade social da população local, frequentemente exposta a riscos de desastres, como inundações e rompimentos de barragens; e o processo contínuo de expansão urbana que intensifica os problemas de drenagem. Além desses aspectos, destaca-se o conhecimento prévio da área por parte do pesquisador e a facilidade de obtenção de dados técnicos e institucionais sobre a região, fatores que contribuíram para a realização de um estudo detalhado e representativo.

Dessa forma, busca-se avaliar o desempenho dos dispositivos propostos sob duas perspectivas: técnica, com base nos resultados gerados nas simulações, e econômica, por meio de composições de custos utilizando valores obtidos junto à Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP). Este órgão, integrado à Prefeitura Municipal de Belo Horizonte - Minas Gerais, estabelece documentos técnicos que servem de referência para a correta execução e especificação de diversos serviços de engenharia no estado de Minas Gerais.

2. Material e Métodos

Para a realização deste trabalho, foi escolhida uma área já urbanizada e que sofre com constantes problemas de inundações (Figuras 1 e 2). Localizado no município de Juiz de Fora - Minas Gerais, o bairro de Igrejinha está situado às margens da rodovia BR-267, com sua população concentrada às margens do córrego que dá nome ao bairro.

A área delimitada para o estudo compreende uma área de contribuição de 16,50 km², onde se localiza o bairro de Igrejinha e as principais ocorrências de alagamentos frequentes (Prefeitura de Juiz de Fora, 2022).

Figura 1 - Localização da área de estudo e delimitação das sub-bacias

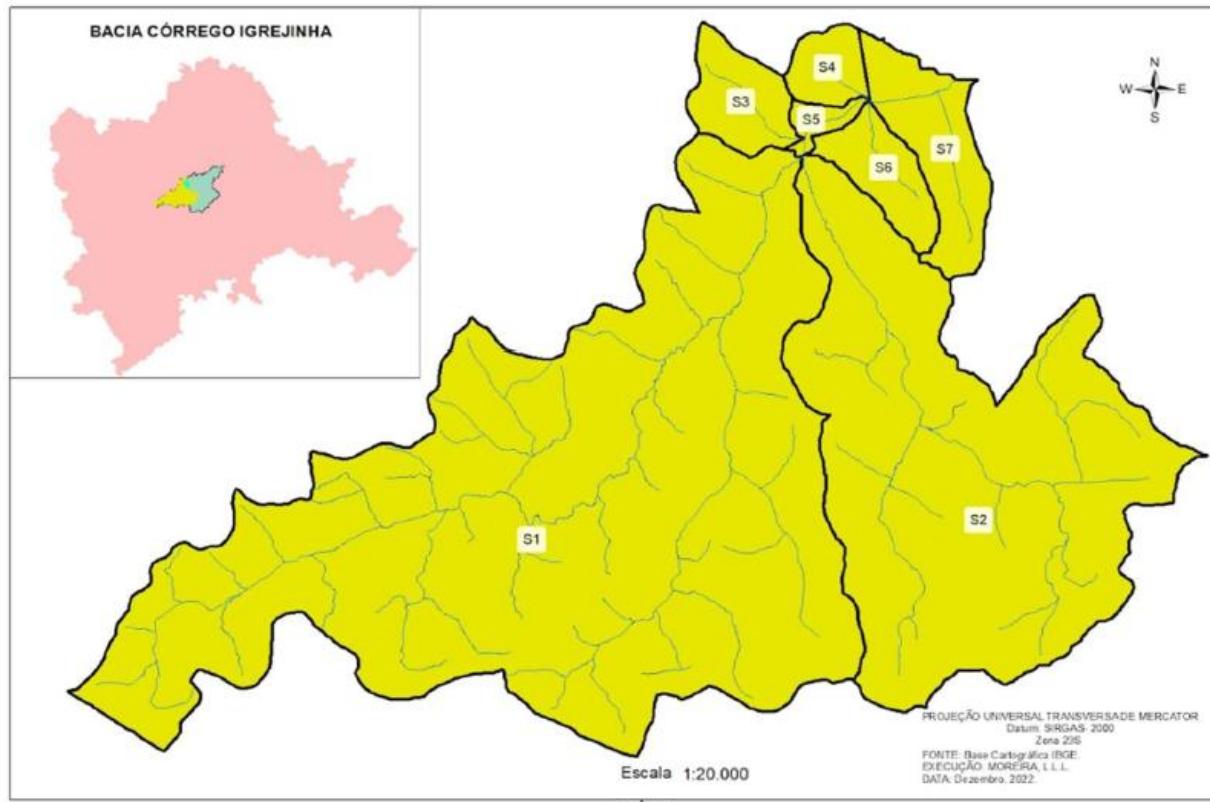


Figura 2 - Representação da delimitação da área urbana do bairro Igrejinha e dos elementos relevantes para o referido estudo: cursos d'água, trechos do canal principal, pontos de início e final (exutório) do estudo



Por meio da aplicação da modelagem hidrológica utilizando o software SWMM, foram criados os três cenários apresentados a seguir:

- Cenário 1 - Modelo Hidrológico Inicial: Criação de um modelo inicial que representa a situação atual do sistema de macrodrenagem local.
- Cenário 2 - Modelo Hidrológico Convencional: criação de um novo modelo do sistema de macrodrenagem redimensionado utilizando técnicas de drenagem convencionais.
- Cenário 3 - Modelo Hidrológico com Amortecimento das Vazões: criação de um novo modelo do sistema de macrodrenagem redimensionado usando técnicas de detenção provisórias.

Para definir os parâmetros necessários à construção dos cenários, foram utilizados dados de levantamentos bibliográficos científicos, obtidos por meio de plataformas de pesquisa existentes, e informações de documentos técnicos existentes na região, incluindo planos municipais, normas técnicas, instruções normativas, leis, periódicos locais, entre outros.

Para a determinação da chuva de projeto utilizada nas simulações hidrológicas, adotou-se a equação de intensidade-duração-frequência (IDF) do município de Juiz de Fora, conforme o Plano de Drenagem do Município de Juiz de Fora e o seu Manual de Drenagem, expressa pela relação (Prefeitura de Juiz de Fora, 2011):

$$i \text{ (mm/h)} = \frac{3000 \times TR^{0,173}}{(Tc + 23,965)^{0,96}}$$

onde:

- i - intensidade da chuva (mm/h);
- TR - tempo de retorno (anos);
- Tc - tempo de concentração (minutos).

O tempo de retorno adotado para a modelagem foi de 100 anos, conforme recomendação para sistemas de macrodrenagem (Tucci, 2007; Baptista et al., 2015) e diretrizes do próprio plano municipal. Já o tempo de concentração inicial, definido pela comparação entre métodos consagrados (Kirpich, Ventura e Califórnia), foi fixado em 90 minutos, valor considerado mais representativo das características topográficas e hidrológicas da bacia do córrego Igrejinha.

Com base nesses parâmetros, a intensidade de precipitação resultante para o evento de projeto foi de aproximadamente 70,6 mm/h, valor compatível com as estimativas do Plano de Drenagem do município e utilizado como entrada no modelo hidrológico implementado no software SWMM. Essa abordagem permitiu assegurar coerência entre as simulações desenvolvidas neste estudo e os critérios técnicos oficiais empregados pela Prefeitura de Juiz de Fora.

No ambiente SWMM, foram criados objetos que representam os principais elementos do sistema de macrodrenagem local, utilizando o traçado natural do curso d'água como referência para a construção desses objetos. Nos pontos onde os tributários desembocavam no canal principal, foram criados nós. Entre dois nós sucessivos, foram criados canais que representam trechos do canal natural, totalizando cinco (C1, C2, C3, C4 e C5). Foi necessário também definir um pluviômetro local, onde foi inserida uma projeção de precipitação pluvial incidente sobre a área, e no ponto final da área de estudo, foi criado o nó de saída (O1), o exutório da área de estudo.

A declividade média do canal principal do córrego Igrejinha foi obtida a partir da análise altimétrica dos perfis longitudinais e das cotas de fundo em cada trecho de modelagem. O canal, subdividido em cinco trechos, correspondentes às seções delimitadas no modelo hidráulico, tem os seguintes valores de declividade por trecho: C1 = 1,23%, C2 = 2,45%, C3 = 3,10%, C4 = 4,82% e C5 = 3,87%. A declividade média ponderada ao longo de todo o canal resultou em aproximadamente 3,5%, caracterizando um curso d'água de escoamento moderado, típico de bacias urbanas com trechos parcialmente canalizados e com variações topográficas acentuadas. Esses valores foram utilizados como parâmetros de entrada no software SWMM, contribuindo para o cálculo da velocidade de escoamento, tempo de concentração e estimativas de vazão de pico nos diferentes cenários simulados.

Como forma de padronizar os resultados obtidos, utilizou-se um valor limite para a capacidade total de vazão do canal. Filho e Costa (2012) realizaram um levantamento dos principais parâmetros

adotados para o dimensionamento de canais e galerias. Nesta pesquisa, foram avaliados os critérios recomendados por autores e órgãos especialistas em drenagem urbana, como Carlos Tucci, Azevedo Netto, Porto, DAEE-CETESB, para fins de projetos de galerias e canais. Um dos critérios indicados foi a relação entre a altura da lâmina d'água e a altura máxima do canal sem causar o transbordamento da calha. Os autores obtiveram, como média o valor de 0,85, ou seja 85% da capacidade do canal como coeficiente indicado para segurança da estrutura.

Portanto, para efeito de comparação técnica, foi definido neste trabalho que a capacidade limite ideal para cada trecho do canal estudado deve ser menor ou igual a 85%.

Quanto à seção padrão de cada trecho, foram definidas de forma diferente para cada cenário. No Cenário 1, as seções adotadas foram aquelas obtidas em um levantamento topográfico realizado em 2011 no Plano de Drenagem do Município de Juiz de Fora, ao qual o autor teve acesso (JUIZ DE FORA, 2011). Nos Cenários 2 e 3, algumas seções do canal, além de novos dispositivos, foram dimensionadas para buscar atender ao limitante do estudo, capacidade máxima até 85%.

Em relação ao Cenário 2, foram escolhidos dois tipos de canalização: canalização com revestimento de concreto armado, para locais com pouco espaço disponível e presença de distúrbios construtivos; e canalização com revestimento de gabião tipo caixa, onde há espaço disponível para sua instalação. Ambos os tipos de canalização foram projetados com o objetivo de aumentar a seção livre do canal, reduzir o índice de rugosidade e, claro, garantir a estabilidade dos taludes escavados. Além disso, nos casos em que foi necessário o alteamento das margens, foi proposto o uso de muros de contenção de enchentes, ou seja, diques de concreto armado. Em resumo, as seguintes modificações foram projetadas para o canal em cada trecho:

- Trecho C1: Canalização com revestimento de gabião-caixa em toda a sua extensão (125 m).
- Trecho C2: Utilização de dique de contenção, elevando parte de suas margens em 75 centímetros (50 m de cada margem).
- Trecho C3: Canalização com revestimento de gabião-caixa em toda a sua extensão (50 m).
- Trecho C4: Canalização com revestimento em concreto armado (430 m).
- Trecho C5: Manutenção da condição inicial do canal.

No Cenário 3, duas bacias de detenção abertas e gramadas foram criadas em pontos estratégicos para proporcionar atenuação de vazão e reduzir os fluxos que entram no canal. A primeira bacia de detenção proposta tem capacidade de 25.000 m³ e ocupa uma área de 10.000 m². Ela foi implantada a montante da área de estudo, às margens da rodovia BR-267 antes do trecho C1. A segunda bacia de detenção foi implantada no trecho C3 ao longo do canal em estudo, com capacidade de 360 m³ e ocupando uma área de 900 m².

Na figura 3 é representada a localização das duas bacias de detenção propostas no estudo para o cenário 3.

No entanto, mesmo com a implementação das bacias, foram necessários ajustes em alguns trechos do canal para garantir que a capacidade desses locais não ultrapassasse 85%. No trecho C1, foi necessário implementar a canalização com revestimento de gabião-caixa por 130 metros, conforme realizado no cenário 2, e próximo à bacia de detenção 2, no trecho C3, foi necessário altear 50 metros de canal com um dique de concreto armado de 40 centímetros.

Ressalta-se que não foram utilizados, para fins de validação das simulações, dados fluviométricos locais devido à inexistência de estação de medição ativa na bacia do córrego Igrejinha, situação comum em bacias urbanas de pequeno porte. Assim, a calibração foi realizada com base em parâmetros hidrológicos e geométricos obtidos de referências técnicas e levantamentos locais.

Com os resultados obtidos em cada um dos modelos, a pesquisa seguiu para sua nova fase, a comparação entre o modelo convencional de drenagem urbana e o modelo sustentável. Essa comparação ocorreu em dois aspectos: a análise do desempenho técnico dos cenários, onde foram avaliados os resultados apresentados nas simulações quanto à capacidade hidráulica de cada trecho do canal e à vazão no ponto de saída; e a análise dos custos envolvidos na implantação, manutenção e operação dos dispositivos de dimensionamento.

Figura 3 - Localização das bacias de detenção propostas



Quanto à análise dos custos envolvidos em cada cenário, o estudo baseou-se nos projetos tipos indicados nos cadernos técnicos da SUDECAP para canais com revestimento de gabião tipo caixa, canais com revestimento de concreto armado, muros de contenção e bacias de detenção abertas e gramadas (Superintendência de Desenvolvimento da Capital, 2023). Isso foi necessário para garantir a padronização do levantamento proposto.

Com a definição desses padrões, foi possível estimar os custos de implantação, manutenção e operação desses novos dispositivos. Moura (2004) propôs um detalhamento de custos para esses projetos, a fim de estimar os recursos financeiros necessários para a implantação desses elementos, bem como criar um detalhamento de custos para os serviços de manutenção e operação. Utilizando como referência o detalhamento de custos proposto por Moura (2004), os serviços propostos foram revisados com o objetivo de adaptá-los à realidade local. Os valores unitários descritos no estudo de Moura (2004) foram atualizados segundo o caderno de preços SUDECAP com a data base de agosto de 2023, data da última tabela de preços existente na fase de elaboração dos estudos.

Em seu estudo, Moura (2004) relata dificuldades na construção da composição de custos para os serviços de manutenção e operação de bacias de detenção, devido ao estágio inicial de implantação dessas instalações no momento da execução de seu trabalho. Portanto, para a construção da composição de custos para esses serviços, utilizou-se como referência o estudo realizado por Souza et al. (2013). Neste estudo, foram levantados os custos de manutenção praticados em quatro bacias de detenção em operação na cidade de Belo Horizonte - MG, todas com características semelhantes às bacias propostas neste estudo, abertas e gramadas.

Entretanto, Jussara (2009) afirma que a comparação entre duas alternativas de projeto deve ser feita em um período de análise semelhante, evitando-se priorizar investimentos com retornos de curto ou longo prazo. Para tanto, a autora sugere a utilização do conceito de vida útil, que pode ser entendido como o período entre o início da intervenção, ou da operação dos serviços implantados, até a fase em que a operação do projeto se torna economicamente inviável, não mais rentável. Em relação à vida útil

de estruturas de drenagem, Moura (2004) indica um período de 30 anos para canalizações e 15 anos para bacias de retenção abertas e gramadas.

Portanto, para que a comparação econômica entre os modelos siga as diretrizes das referências técnicas avaliadas, as bacias de detenção definidas no cenário 3 serão reinstaladas após 15 anos de operação, o que corresponde à vida útil de todas as instalações previstas no caso em estudo. Reforça-se que esta estimativa foi realizada de forma a permitir uma comparação mais precisa dos custos no estudo realizado.

3. Resultados e Discussões

Após a realização do processo de simulação, foram definidas, de acordo com as possibilidades apresentadas pelo software SWMM, duas formas de apresentação dos resultados obtidos: a indicação das vazões máximas obtidas nas simulações no ponto de exutório do estudo (nó 01), representando o impacto gerado a jusante da área analisada, e a tabela das capacidades máximas atingidas em cada trecho durante os períodos de vazão máxima do canal.

A vazão máxima no ponto de saída da área de estudo nos três cenários é apresentada a seguir:

- Cenário 1: 34,57 m³/s (1 hora e 40 minutos após o início do evento de chuva).
- Cenário 2: 42,80 m³/s (1 hora e 30 minutos após o início do evento de chuva).
- Cenário 3: 27,48 m³/s (1 hora e 40 minutos após o início do evento de chuva).

Na tabela 1, são apresentadas as capacidades máximas atingidas em cada trecho, nos 3 cenários.

Tabela 1 - Capacidades máximas de cada trecho no período de maior vazão – Cenários 1, 2 e 3.

Período	Trechos				
	C1	C2	C3	C4	C5
Cenário 1					
01:30:00	100%	80%	100%	85%	27%
01:35:00	100%	68%	100%	83%	31%
01:40:00	100%	80%	100%	94%	34%
01:45:00	100%	71%	100%	89%	34%
Cenário 2					
01:30:00	90%	66%	84%	85%	38%
01:35:00	91%	54%	61%	75%	37%
01:40:00	91%	62%	77%	84%	40%
01:45:00	91%	55%	64%	77%	38%
Cenário 3					
01:30:00	85%	77%	85%	66%	21%
01:35:00	87%	72%	72%	63%	23%
01:40:00	86%	76%	83%	71%	26%
01:45:00	87%	73%	73%	66%	26%

Com os resultados obtidos, procede-se ao estudo dos custos associados à implementação dos três cenários, seguindo os procedimentos relatados anteriormente. A tabela 2 apresenta um resumo dos custos totais de implementação, manutenção e operação dos equipamentos propostos em cada cenário, dentro do período de 30 anos definido como a vida útil de todo o projeto.

Com base nos valores obtidos, estima-se que sejam necessários R\$ 6.446.678,31 para a implantação do modelo convencional proposto, e R\$ 4.072.086,00 para a manutenção e operação do sistema durante sua vida útil.

Em relação ao modelo de sistema mais sustentável, cenário 3, sua implementação requer um valor total de R\$ 5.660.563,78. Para garantir a manutenção e operação das instalações definidas durante a

vida útil de 30 anos do projeto, indica-se um valor total de R\$ 5.385.687,00.

Tabela 2 - Custos totais considerando uma vida útil de 30 anos

Trechos	Custo total de implementação	Custo de manutenção/operação
Trecho C1 redimensionado (Cenário 2)	R\$ 857.978,68	R\$ 999.375,00
Trecho C2 redimensionado (Cenário 2)	R\$ 50.348,01	R\$ 49.440,00
Trecho C3 redimensionado (Cenário 2)	R\$ 245.872,01	R\$ 375.030,00
Trecho C4 redimensionado (Cenário 2)	R\$ 5.292.479,61	R\$ 2.648.241,00
Implementação da bacia de detenção 1 (Cenário 3)	R\$ 4.587.892,00	R\$ 4.290.000,00
Trecho C1 redimensionado (Cenário 3)	R\$ 833.815,11	R\$ 999.375,00
Implementação da bacia de detenção 2 (Cenário 3)	R\$ 207.839,52	R\$ 46.872,00
Trecho C3 redimensionado (Cenário 3)	R\$ 31.017,15	R\$ 49.440,00

Em relação ao desempenho técnico dos modelos desenvolvidos, no Cenário 2 - modelo hidrológico convencional, destacam-se os trechos C2, C3, C4 e C5, que respeitaram o limite máximo estabelecido para a capacidade de transporte de vazão dentro do canal. Por outro lado, no trecho C1 não foi possível atingir esse limite devido às limitações construtivas do local, obtendo-se um valor máximo de 91% da capacidade do canal neste trecho. Em resumo, para atingir os resultados obtidos na tabela 2, foram necessários ajustes nos trechos C1, C2 (parcialmente), C3 e C4.

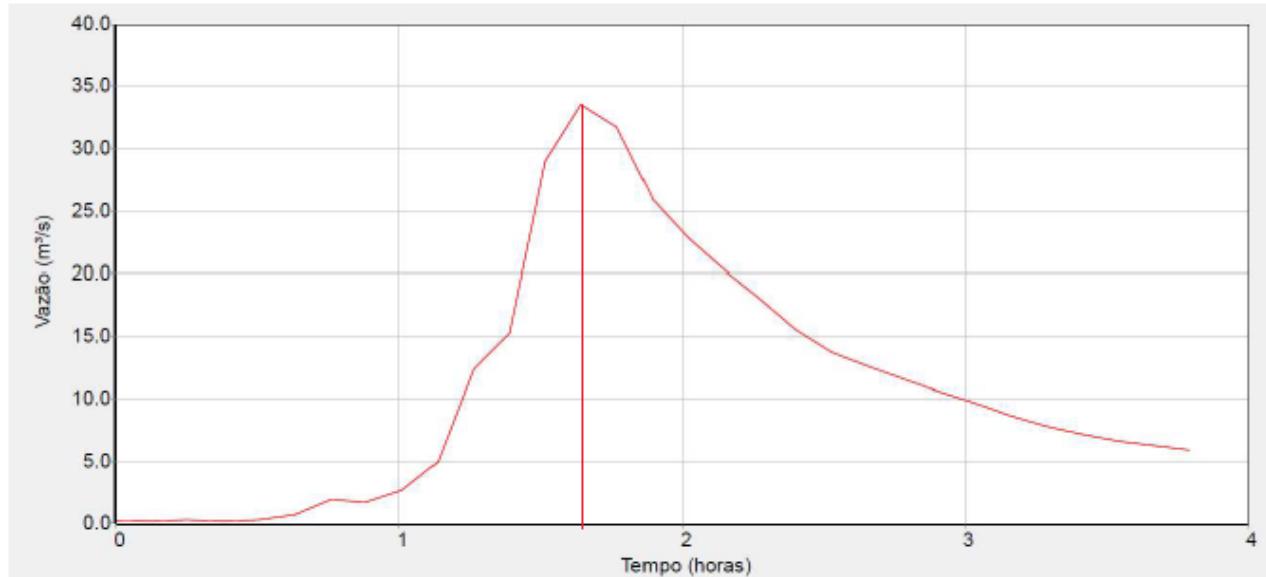
No Cenário 3 - modelo hidrológico com amortecimento das vazões, em relação ao desempenho técnico do novo sistema de macrodrenagem proposto, também foi possível atingir o limite de 85% da capacidade de transporte nos trechos C2, C3, C4 e C5. No trecho C1, com a mesma proposta apresentada para o modelo convencional, foi possível atingir a capacidade máxima de 87%, demonstrando uma vantagem sobre as técnicas convencionais neste trecho. Em resumo, para atingir os resultados descritos na tabela 1, foi necessário modificar os trechos C1 e C3 e implementar duas bacias de detenção na área de estudo, próximas ao curso d'água.

Ainda sobre o desempenho técnico dos cenários 2 e 3, é extremamente relevante analisar a vazão máxima que incide no ponto de saída nos três modelos criados, o exutório O1, identificando o impacto gerado a jusante da área de estudo. Na tabela 3 é apresentado as vazões máximas obtidas na simulação de cada cenário.

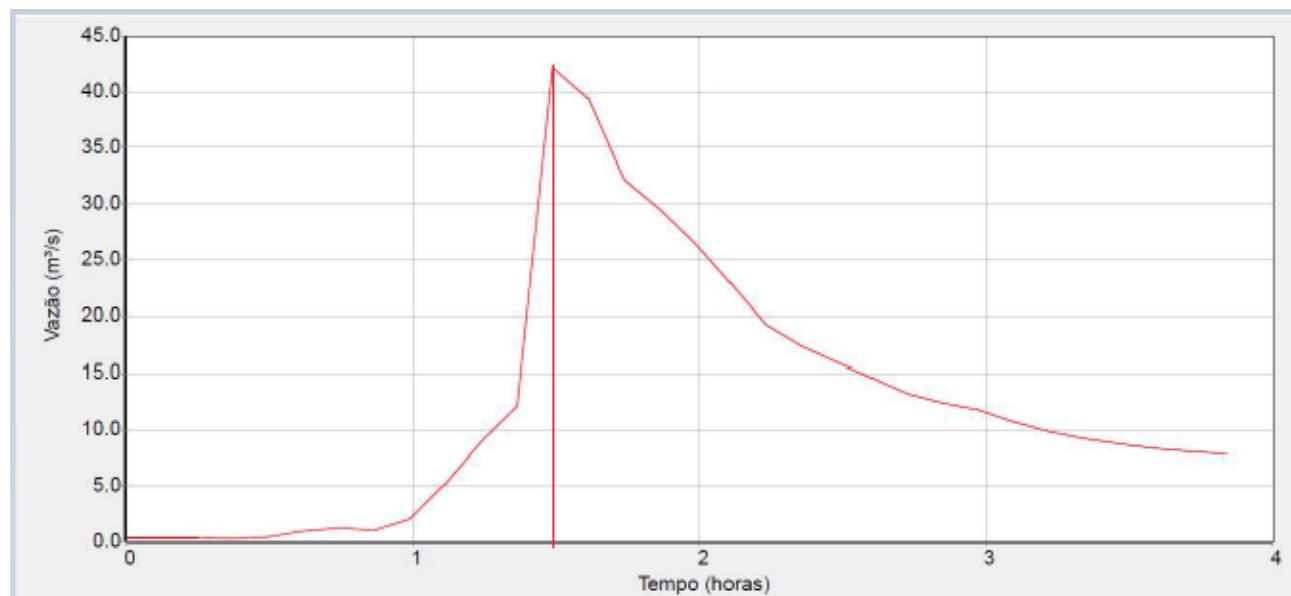
Tabela 3 - Vazões Máximas em cada cenário simulado

Cenários	Vazão Máxima (m ³ /s)
Cenário 1 (Atual)	34,57
Cenário 2 (Convencional)	42,80
Cenário 3 (Sustentável)	27,48

Além das vazões máximas, o SWMM permite a elaboração de hidrogramas para cada simulação. Na figura 4, é apresentado o hidrograma para o cenário 1, situação atual.

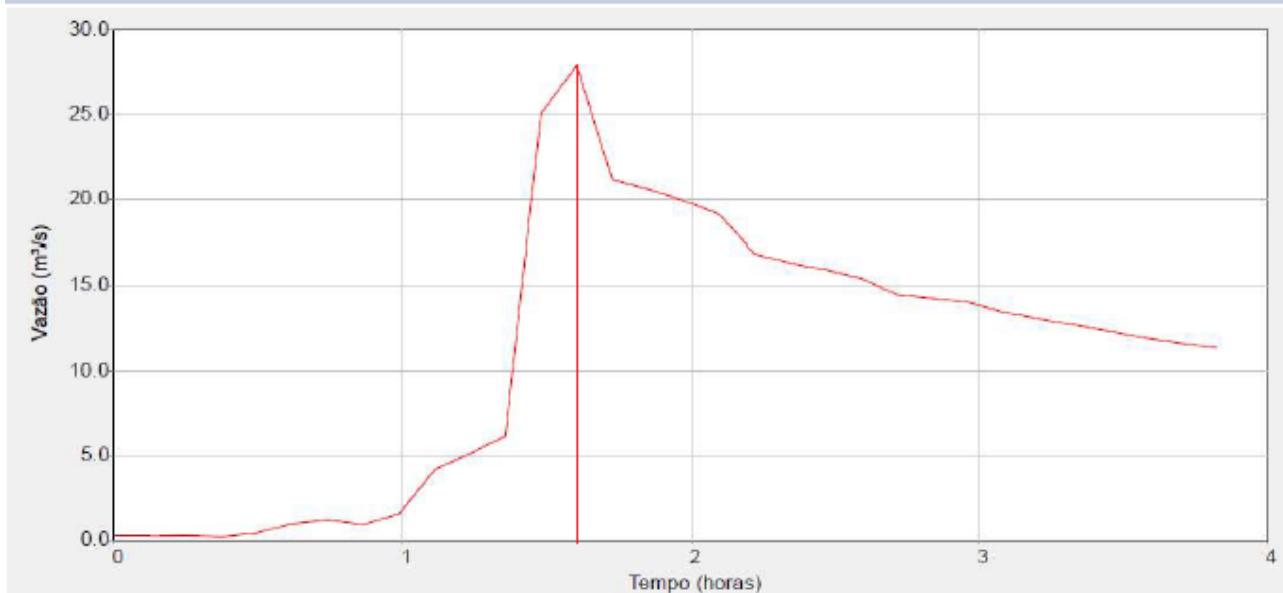
Figura 4 - Hidrograma Cenário 1

Na figura 5, é apresentado o hidrograma para o cenário 2, modelo convencional.

Figura 5 - Hidrograma Cenário 2.

Na figura 6, é apresentado o hidrograma para o cenário 3, modelo sustentável.

Figura 6 - Hidrograma Cenário 3



Com a aplicação do Cenário 2 (convencional), houve um aumento de 24% na vazão máxima no ponto de saída, por outro lado, com o Cenário 3 (sustentável) houve uma diminuição de 20,5% em relação à vazão máxima atual neste ponto, ilustrando a vantagem positiva da aplicação de técnicas de detenção, reduzindo as vazões de pico a jusante da área em estudo. Este resultado vai ao encontro dos dados obtidos na pesquisa realizada por Alves et al. (2022), onde foi constatado que a utilização de dispositivos de detenção em um assentamento precário na cidade de Campina Grande - PB reduziu significativamente o volume de alagamentos no local, de acordo com os cenários construídos.

Em relação ao cenário de projeto sustentável (Cenário 3), foram introduzidas medidas compensatórias de drenagem, como bacias de detenção abertas e gramadas, e a ampliação de áreas verdes com infiltração direta no solo, resultando em aumento significativo da área permeável da bacia. As simulações indicaram que a área permeável efetiva passou de aproximadamente 22% no cenário atual para cerca de 38% no cenário sustentável, representando um acréscimo de 16 pontos percentuais na superfície disponível para infiltração. Esse aumento de permeabilidade contribuiu diretamente para a recarga dos aquíferos rasos, reduzindo o volume de escoamento superficial e promovendo maior armazenamento temporário nas camadas subsuperficiais. Além de reduzir as vazões de pico no exutório (queda de 20,5% em relação à condição atual), a expansão da área permeável auxilia no retardamento do escoamento e na melhoria da qualidade da água pluvial, em consonância com as diretrizes de sustentabilidade do Plano Municipal de Drenagem de Juiz de Fora.

O tempo de concentração inicial adotado para as simulações foi de 90 minutos, obtido pelo método de Kirpich e aplicado como parâmetro padronizado em todos os cenários para fins comparativos. A partir dos hidrogramas simulados e dos dados obtidos no SWMM, observou-se que o tempo de ocorrência da vazão máxima variou entre os cenários: Cenário 1 (situação atual) — 100 min; Cenário 2 (convencional) — 90 min; Cenário 3 (sustentável) — 100 min. Logo, as intervenções convencionais reduziram o tempo de resposta hidráulica (tempo-de-pico) em aproximadamente 10 minutos em relação à condição atual, ao passo que o cenário sustentável manteve o tempo-de-pico semelhante ao do cenário atual, porém com redução expressiva da magnitude do pico ($\approx 20,5\%$). Esses resultados indicam que, na configuração estudada, as bacias de detenção atuaram preferencialmente na amortização da vazão máxima em vez de deslocar de forma significativa o tempo de ocorrência do pico a jusante.

Além disso, Moura (2004) e Santos (2021) também abordam os efeitos positivos do uso de drenagem sustentável em seus estudos. Moura (2004) concluiu que o uso de técnicas alternativas obteve as melhores avaliações em sua pesquisa, e Santos (2021) abordou que cenários que utilizam princípios sustentáveis reduzem a transferência de vazão para jusante e, consequentemente, o risco de inundações.

Com os resultados obtidos, foi possível construir uma estimativa de orçamento para implantação, manutenção e operação dos novos sistemas de macrodrenagem utilizados nos modelos convencional e sustentável, de forma a comparar os custos envolvidos.

Considerando os orçamentos construídos, observa-se que os custos estimados de implementação dos equipamentos propostos no Cenário 3 (sustentável) são menores em comparação aos equipamentos do Cenário 2 (convencional), representando uma redução de 12% nos valores requeridos. Por outro lado, os custos de manutenção e operação, considerando uma vida útil de 30 anos, são maiores no modelo SUDS, representando um aumento de 32% em relação aos custos do modelo convencional.

Ao analisar os custos totais obtidos, implantação, operação e manutenção, os recursos necessários para a implantação do modelo mais sustentável são 5% maiores que no cenário convencional, o que se traduz em uma pequena desvantagem competitiva.

Esses valores obtidos diferem ligeiramente dos resultados apresentados por Moura (2004) para cenários que utilizam bacias de detenção abertas e gramadas, complementadas por dispositivos convencionais de drenagem urbana. As maiores discrepâncias ocorreram nas diferenças no custo total, que indicaram percentuais superiores a 22% para cenários alternativos, e nos custos de implementação, que indicaram valores superiores para técnicas alternativas, na ordem de 20%.

No entanto, isso era de certa forma esperado. Moura (2004) discutiu em seu estudo que a mensuração dos custos da implementação das chamadas técnicas alternativas de drenagem apresentou algumas dificuldades devido à aplicação limitada dessas técnicas no Brasil à época do estudo. Por esse motivo, a autora destacou que pesquisas futuras devem verificar os valores utilizando bases de dados e informações mais recentes, o que foi feito neste estudo utilizando dados mais recentes das tabelas orçamentárias da SUDECAP e estudos de caso reais, como o realizado por Souza et al. (2013).

Outro fator relevante relacionado aos resultados obtidos em termos de desempenho econômico são os aspectos executivos relacionados às estruturas dos dispositivos propostos. Estes foram estimados para permitir a coleta dos custos envolvidos de forma parametrizada, de acordo com os padrões tipos obtidos nos cadernos técnicos da SUDECAP (SUDECAP, 2023), sem a necessidade de dimensionamento estrutural para sua correta implementação, o que foge ao escopo deste trabalho.

Para elaborar um orçamento detalhado para a implementação, é aconselhável elaborar projetos estruturais, incluindo o dimensionamento dos dispositivos de contenção e das fundações necessárias. Além disso, cada proposta deve ser avaliada de acordo com as peculiaridades locais, que influenciarão os tipos de dispositivos a serem implementados, suas dimensões e os custos envolvidos.

3.1 Análise da política municipal de drenagem urbana em Juiz de Fora e a contribuição do estudo

A cidade de Juiz de Fora está em processo de elaboração de seu Plano de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (PDMAPU-JF), instrumento que pretende estabelecer diretrizes integradas para controle de escoamento superficial, redução de inundações, priorização de áreas críticas e incorporação de técnicas sustentáveis no sistema de drenagem municipal (JUIZ DE FORA, 2025).

Nesse contexto institucional, o presente estudo oferece contribuição relevante ao município. O trabalho, aplicado no bairro Igrejinha (Juiz de Fora - MG), uma área com históricos de alagamentos, inundações, vulnerabilidade social elevada e expansão urbana acelerada, gera evidências técnicas e econômicas para embasar intervenções locais e o planejamento municipal. Os resultados, como a redução de aproximadamente 20,5% na vazão máxima com técnica SUDS, e a comparação de custos entre soluções convencionais e sustentáveis, alinham-se diretamente às metas do PDMAPU-JF de reduzir o pico de escoamento, ampliar a infiltração e retardo hidráulico, e priorizar áreas mais vulneráveis.

Dessa forma, o estudo não só fortalece o diagnóstico e a implementação do plano municipal ao fornecer dados de caso real e metodologia aplicável, mas também serve como base para políticas de investimento, priorização de trechos de intervenção e adoção de dispositivos de drenagem urbana sustentável no âmbito da cidade.

4. Conclusões

Com o trabalho realizado, foi possível avaliar a aplicação do software SWMM em um problema real de macrodrenagem no município de Juiz de Fora, que tem sido utilizado com mais enfoque em problemas de microdrenagem. Com a criação dos cenários propostos, foi possível validar diversas soluções para os problemas encontrados no modelo hidrológico inicial da área de estudo. Além disso, foi possível avaliar o impacto gerado pela aplicação de dispositivos dentro dos conceitos convencional e sustentável, indicando que a ferramenta é compatível com ambos os conceitos, além de permitir adaptações dentro da plataforma.

Em relação ao desempenho dos cenários criados, conclui-se que, para o caso apresentado neste trabalho, o modelo construído utilizando conceitos de drenagem sustentável obteve os melhores resultados na avaliação do desempenho técnico, reduzindo o impacto do escoamento superficial gerado pela chuva de projeto. Em relação ao desempenho econômico, observa-se que os custos de implementação são menores para as técnicas mais sustentáveis, mas os custos de manutenção e operação são significativamente maiores.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com a aplicação de técnicas dentro do conceito SUDS, foi necessário aplicar conceitos convencionais de drenagem para aumentar a capacidade de transporte de fluxo do canal em alguns trechos. Portanto, fica claro que a utilização de um ou outro conceito não é excludente, pelo contrário, em alguns casos ambos os conceitos devem ser utilizados de forma complementar, principalmente em bacias hidrográficas já urbanizadas.

Destaca-se que com as análises realizadas neste trabalho e os resultados encontrados é possível subsidiar gestores públicos em relação à definição de estratégias para solução de problemas de drenagem urbana.

Em relação ao município de Juiz de Fora, apesar dos avanços institucionais, o município ainda carece de estudos técnicos locais que quantifiquem os efeitos hidráulicos e econômicos das soluções propostas, condição essencial para orientar investimentos públicos. Nesse contexto, o presente trabalho contribui diretamente ao oferecer simulações hidrológicas com o software SWMM aplicadas ao bairro Igrejinha, área crítica de inundações e vulnerabilidade social, podendo servir de subsídio para projetos técnicos no local.

Referências

- Alves, L. G. F., Galvão, C. de O., Santos, B. L. de F., Oliveira, E. F. De & Moraes, D. A. de. (2022). Modelagem e avaliação de sistemas de drenagem urbana sustentáveis em assentamentos densos e precários sujeitos a inundações repentinhas. *LHB*, 108(1), 1-11. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/27678490.2021.2016024>
- Baptista, M., Nascimento, N. & Barraud, S. (2015). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH.
- Caparrós-Martínez, J. L., Milán-García, J., Rueda-López, N. & Pablo-Valenciano, J. de. (2020). Infraestrutura verde e água: uma análise da pesquisa global. *Água*, 12(6), 1760. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1760>
- Carneiro, B. L. D. S., Filho, F. de A. de S., Carvalho, T. M. N. & Raulino, J. B. S. (2022). Risco hidrológico de ruptura de barragens devido às mudanças climáticas. *RBRH*, 27(19). <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/nkHHXwD7DyPjrVxh83RsbZK/?lang=en>
- Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J. & Sánchez, J. P. R. (2022). Modelagem de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) para apoio à tomada de decisões: uma revisão quantitativa sistemática. *Science of The Total Environment*, 806(2), 150447. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721055248>

Filho, F. C. M. de M. & Costa, T. D. (2012). Sistemática de cálculo para o dimensionamento de galerias de águas pluviais: uma abordagem alternativa. *REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 1(4), 12-22. <https://revistas.ufg.br/index.php/reec/article/view/18162>

França, L. R. C., Coura, M. de A., Oliveira, R. de, Rodrigues, A. C. L. & Medeiros, D. L. R. de. (2022). Aplicação de técnicas de desenvolvimento urbano de baixo impacto no controle da poluição das águas do Riacho das Piabas, Campina Grande, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(3), 541-552. <https://www.scielo.br/j/esa/a/BhCkGjwTMX7hDm6m3HVZSHK/abstract/?lang=pt>

Prefeitura de Juiz de Fora. Prefeitura de Juiz de Fora (2011). *Plano de Drenagem Parte 1: Zona Norte*. Juiz de Fora, MG: PJF. https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planos_programas/drenagem.php

Prefeitura de Juiz de Fora. Prefeitura de Juiz de Fora (2022). *Plano de Saneamento Básico de Juiz de Fora: 1ª Revisão*. Juiz de Fora, MG: PJF. https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planosprogramas/saneamentobasico/revisao_psb2022/index.php

Prefeitura de Juiz de Fora. Prefeitura de Juiz de Fora (2025). *Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Município de Juiz de Fora (PDMAPU)*. Juiz de Fora, MG: PJF. https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/so/plano_de_drenagem/index.php

Jussara, M. C. (2009). *Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas*. Tese (Doutorado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

Moura, P. M. (2004). *Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Pontes, V. C., Fragoso Jr., C. R.; Neves, M. G. F. P. das & Souza, V. C. B. de. (2021). Efeito da variabilidade espacial e temporal de dados de precipitação medidos e de radar na modelagem hidrológica de bacias urbanas. *RBRH*, 26. <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/WmxQDyRR7GNmr56j8vh3j7v/?lang=en>

Santos, M. F. N. dos, Barbassa, A. P. & Vasconcelos, A. F. (2021). Gestão de águas pluviais em áreas altamente urbanizadas nos trópicos: avaliação do ciclo de vida de práticas de desenvolvimento de baixo impacto. *Journal of Hydrology*, 598, 126409. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216942100456X>

Silva, L. H., Filho, F. C. M. de M., Rodrigues, A. L. M. & Morais, E. B. de. (2020). Sistemas de bioretenção para gestão de águas pluviais: visão geral e critérios de projeto. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 9(11). <https://rsdjurnal.org/index.php/rsd/article/view/10335>

Souza, M. F., Coelho, M. M. L. P., Moura, P. M., Baptista, M. B. & Menezes, M. V. (2013). *Custódia de manutenção de bacias de detenção para controle de cheias na cidade de Belo Horizonte - MG*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais [...]. Bento Gonçalves: ABRH. <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&>

Superintendência de Desenvolvimento da Capital. *Tabelas de Preço: outubro de 2023*. Belo Horizonte, MG: SUDECAP. <https://prefeitura.pbh.gov.br/sudecap/tabela-de-precos>

Tang, S., Jiang, J., Zheng, Y., Hong, Y., Chug, E., Shamseldin, A. Y., Wei, Y. & Wang, X. (2021). Análise de robustez da modelagem da qualidade de águas pluviais com infraestruturas LID a partir do monitoramento de campo baseado em eventos naturais. *Science of The Total Environment*, 753, 504-514. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720355364>

Ximena, C. F. (2021). Sistemas urbanos de drenagem sustentável como meio de controle de inundações. *Revista do Ministério Público do RS*, 1(90), 275-273. <https://revistadomprs.org.br/index.php/amprs/article/view/253>

Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X. & Yu, G. (2019). An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of Environmental Management*, 231, 504-514. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.046>