UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JESIMARA DE SOUZA MARQUES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA PA BD 47

JUIZ DE FORA

2023

JESIMARA DE SOUZA MARQUES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA PA BD 47

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Nathalia Roland

JUIZ DE FORA

2023

JESIMARA DE SOUZA MARQUES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA PA BD 47

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Civil.

APROVADO EM: 18 / 12 /2023

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br NATHALIA ROLAND DE SOUZA RIBEIRO
Data: 19/12/2023 14:49:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

PROFA. DRA. NATHALIA ROLAND DE SOUZA RIBEIRO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

ORIENTADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br CELSO BANDEIRA DE MELO RIBEIRO
Data: 19/12/2023 14:38:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

PROFESSOR DR. CELSO BANDEIRA DE MELO RIBEIRO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

EXAMINADOR

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO GAMA DE ARAUJO VELEZ
Data: 19/12/2023 10:52:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

ENG. AMBIENTAL E SANITARISTA JOÃO GAMA DE ARAÚJO VELEZ

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

EXAMINADOR

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo e todos sou grata à Deus que tem me sustentado e permitido ter tantas experiências que me mostraram que diante de Sua infinitude tudo é passageiro e que diante do conhecimento existente o que sei é muito pequeno, mas também incrivelmente necessário.

Gratidão à Ele que me fez entender que cada decisão tomada reflete o passado, define o futuro, molda quem somos e abre nossos olhos para o que precisamos ser.

Ao longo da minha trajetória sempre tive a companhia e apoio de pessoas incríveis e é com imenso reconhecimento que expresso minha sincera gratidão ao (à):

Minha mãe, Mirian, que nunca mede esforços para se doar ao próximo, seu amor e cuidado são fundamentais, ao meu pai, Jorge (*in memorian*), que fez da excelência seu patamar em todos os sentidos do que se pode definir como pai.

Meu irmão Jonathas, por sempre me impulsionar a buscar meus objetivos, minha irmã, Josiane, por ser compreensão e ânimo em momentos difíceis, minha cunhada, Jadna, por ser exemplo de respeito à individualidade de cada pessoa, minhas pequenas sobrinhas, Cecília e Aurora, por serem a ternura necessária para dar mais leveza aos meus dias.

Minhas tias, Rose e Giza, e minha primas, Jéssica e Isabela, que sempre me apoiam incondicionalmente.

Meus amigos e amigas, tanto os que partilharam essa jornada comigo, quanto aqueles que acompanharam de fora os desafios propostos, obrigada por muitas vezes serem suporte, distração e ânimo.

Professor Celso, por desenvolver a ideia deste projeto juntamente comigo, por sugerir os meios pertinentes para sua elaboração e principalmente por ser compreensivo durante um momento difícil.

Orientadora, Nathália, por sua assertividade, disponibilidade e retorno sempre ágil e eficiente. Sua orientação foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho de forma extremamente rápida.

João, que mesmo sem termos nos conhecido antes, demonstrou prontidão em compartilhar conhecimentos essenciais para o progresso deste projeto.

Todos que fizeram parte dessa etapa tão importante em minha vida sintam minha profunda gratidão, consideração e respeito.

RESUMO

O rápido crescimento urbano, resultado do aumento populacional, impacta diversos setores socioeconômicos e ambientais. Este estudo foca nos impactos na infraestrutura, especialmente na drenagem urbana. A urbanização gera extensas áreas impermeáveis, causando aumento do escoamento superficial, resultando em alagamentos e enchentes recorrentes. O objetivo do desenvolvimento deste estudo foi avaliar a eficiência dos métodos compensatórios de drenagem na mitigação do escoamento superficial através da comparação da vazão no conduto final de uma bacia hidrográfica sem a implementação desses métodos e com a implementação destes métodos. Os métodos compensatórios escolhidos foram telhados verdes, trincheira de infiltração e pavimento permeável, sendo a bacia hidrográfica estudada a PA BD 47, que está localizada no centro de Juiz de fora, uma área altamente urbanizada. Os dados da bacia hidrográfica foram gerados através do programa QGIS, bem como a área de ocupação de cada um dos métodos. Para análise dos dados utilizou-se o *software* SWMM (*Storm Water Management Model*), da EPA, onde foram analisados os métodos aplicados individualmente, em conjunto e em diferentes combinações. Após a análise dos resultados, observou-se que, embora as reduções obtidas nas vazões médias não tenham sido tão expressivas, houve uma redução considerável nas vazões máximas quando os métodos compensatórios foram aplicados, observando maior eficiência na combinação dos telhados verdes com pavimentos permeáveis, seguida pelo uso individual de pavimentos permeáveis. Conclui-se, portanto, que as técnicas compensatórias de drenagem são soluções que podem ser utilizadas mesmo em bacias altamente urbanizadas, contribuindo para o sistema de drenagem urbana.

Palavras-chave: *Drenagem urbana. Métodos compensatórios. Bacia hidrográfica. SWMM.*

ABSTRACT

The rapid urban growth, a result of population increase, impacts various socio-economic and environmental sectors. This study focuses on the infrastructure impacts, especially in urban drainage. Urbanization generates extensive impermeable areas, causing increased surface runoff, resulting in recurrent floods. The objective of this study was to evaluate the efficiency of compensatory drainage methods in mitigating surface runoff by comparing the flow in the final conduit of a watershed without the implementation of these methods and with their implementation. The chosen compensatory methods were green roofs, infiltration trenches and permeable pavement. The watershed developed was PA BD 47, which is located in the center of Juiz de Fora, a highly urbanized area. Watershed data were generated using the QGIS program, including the occupied area of each method. The SWMM software (Storm Water Management Model) from the EPA was used for data analysis, examining methods applied individually, all together and in different combinations. After analyzing of the results, it was observed that, although the reductions in average flows were not highly significant, there was a considerable reduction in maximum flows when compensatory methods were applied. The combination of green roofs with permeable pavements showed greater efficiency, followed by the individual use of permeable pavements. Therefore, it is concluded that compensatory drainage methods are solutions that can be used even in highly urbanized watersheds, contributing to the urban drainage system.

Keywords: *Urban drainage. Compensatory methods. Watershed. SWMM.*

FIGURAS

Figura 1- Comparação da vazão antes e depois da urbanização..... 19
Figura 2- Comparação entre sistemas de drenagem baseado na canalização e na detenção..... 20
Figura 3 - Camadas de um telhado verde..... 24
Figura 4 - Telhado verde..... 24
Figura 5 - Demonstração de um jardim de chuva..... 25
Figura 6 - Trincheira de infiltração às margens de uma rodovia..... 25
Figura 7 - Visão em corte de uma trincheira de infiltração..... 26
Figura 8 – Microreservatório..... 27
Figura 9a - Pavimento permeável: placas cimentícias permeáveis..... 28
Figura 9b - Pavimento permeável: concregrama..... 28
Figura 9c - Pavimento permeável: piso intertravado..... 28
Figura 9d - Pavimento permeável: pneu reciclado..... 28
Figura 10 - Bacia de detenção combinada à pista de caminhada..... 29
Figura 11 - Limite da bacia PA BD 47, em amarelo..... 31
Figura 12 - Divisão em três sub-bacias e rios existentes na bacia PA BD 47..... 32
Figura 13 - Tipos de cobertura vegetal da bacia PA BD 47..... 33
Figura 14 - Localização do pavimento permeável na bacia PA BD 47..... 35
Figura 15 - Localização das trincheira de infiltração na bacia PA BD 47..... 36
Figura 16 - Divisão da bacia no SWMM definição de nós, condutos e exutório..... 38
Figura 17 - Precipitação x hora no dia 10 de janeiro de 2023, estação 313670213A..... 39
Figura 18 - Coeficiente n de Manning - Escoamento à Superfície Livre..... 40
Figura 19 - Relação entre o uso da terra e a classe hidrológica do solo para definição da Curva Número..... 41
Figura 20 - Seção transversal dos condutos..... 42
Figura 21 - Coeficiente de Manning para condutos abertos..... 42

TABELAS

Tabela 1 - Categorização dos diferentes tipos de técnicas compensatórias..... 23
Tabela 2 - Áreas urbanas, de vegetação e de pastagem em cada sub-bacia.....34
Tabela 3 - Área ocupada por cada método compensatório nas sub-bacias e área total.....37
Tabela 4 - Parâmetros SWMM.....43
Tabela 5 - Porcentagem de influência da trincheira de infiltração em cada sub-bacia.....44
Tabela 6 - Porcentagem de influência do pavimento permeável em cada sub-bacia..... 44
Tabela 7 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e na vazão máxima nos métodos individuais..... 46
Tabela 8 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e vazão máxima nos métodos combinados..... 46
Tabela 9 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e vazão máxima de todos os métodos combinados..... 47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....11
1.1. Justificativa..... 12
1.2. Organização do texto.....13
2. OBJETIVOS..... 13
2.1. Objetivo geral..... 13
2.2. Objetivos específicos..... 14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....14
3.1. Drenagem urbana.....14
3.2. Desafios da drenagem urbana no Brasil e em Juiz de Fora..... 16
3.3. Métodos compensatórios de drenagem..... 19
3.3.1. Técnicas compensatórias não estruturais.....21
3.3.2. Técnicas compensatórias estruturais.....22
3.3.2.1. Telhados verdes..... 24
3.3.2.2. Jardins de chuva..... 24
3.3.2.3. Trincheiras de Infiltração.....25
3.3.2.4. Microrreservatórios.....26
3.3.2.5. Pavimentos permeáveis.....27
3.3.2.6. Bacias de detenção.....28
4. METODOLOGIA.....29
4.1. Área de estudo..... 31
4.2. Modelagem QGIS..... 31
4.3. Modelagem SWMM.....37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 46
6. CONCLUSÃO.....49

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização, crescimento das cidades em decorrência do aumento populacional, influencia no crescimento econômico, nas mudanças sociais, no impacto na agricultura, na concentração populacional, no acesso a serviços, nas mudanças ambientais, na diversidade cultural, no desenvolvimento de infraestrutura e muitos outros aspectos que afetam a vivência em sociedade e a vivência com o meio em que estamos inseridos. Neste trabalho, serão abordados os impactos no desenvolvimento da infraestrutura, mais especificamente sobre o processo de drenagem urbana.

O aumento da urbanização tem como consequência grandes áreas impermeabilizadas, o que significa que o escoamento superficial da água sofre um aumento excessivo, o qual pode causar problemas de alagamentos, que têm se tornado cada vez mais recorrentes em nosso dia a dia (CANHOLI, 2014).

Problemas de alagamentos, inundações e enchentes, que ocorrem devido à inconsistência entre o crescimento da urbanização e a atualização dos sistemas de drenagem urbana, têm trazido riscos e danos para a população.

Atualmente as soluções mais conhecidas, no Brasil, para receber o escoamento superficial das águas pluviais são obras de canalização que aceleram o escoamento com afastamento rápido dos picos de cheias para corpos d'água de jusante (CANHOLI, 2014). Para um sistema de drenagem eficiente, esse conceito, que acelera o escoamento, apenas transfere o problema para outro local. Sendo assim, uma outra abordagem, visa retardar o escoamento superficial:

> [...]o aumento da eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem têm por objetivo promover o retardamento dos escoamentos, de forma a aumentar os tempos de concentração e reduzir as vazões máximas; amortecer os picos e reduzir os volumes de enchentes por meio da retenção em reservatórios; e conter, tanto quanto possível, o run-off no local da precipitação, pela melhoria das condições de infiltração, ou ainda em tanques de contenção (CANHOLI; ALUÍSIO, 2014, p.16).

Observando-se que o aumento da eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem não consiste em acelerar o escoamento das águas pluviais e sim em aumentar os tempos de concentração e reduzir vazões máximas, surgiram as técnicas

compensatórias em drenagem urbana, também conhecidas como técnicas LID (*Low Impact Development*), em português: Desenvolvimento de Baixo Impacto. Segundo Baptista *et al.* (2005) podem ser divididas em dois grupos, as técnicas compensatórias não-estruturais e as técnicas compensatórias estruturais.

Embora todas as técnicas sejam igualmente relevantes, o segundo grupo consiste no foco deste trabalho, sendo o principal objetivo a comparação entre o comportamento da drenagem das águas pluviais sem a aplicação e com a aplicação de determinadas técnicas compensatórias estruturais.

1.1. Justificativa

A ausência de infraestrutura adequada ou ainda alguma inconformidade em sua implementação, decorrente da rápida urbanização das cidades, resultam em diversos problemas urbanos. Essa situação não é diferente em Juiz de Fora, que também é afligida por este obstáculo relacionado à drenagem urbana das águas pluviais.

São problemas constantes, gerados pela insuficiência na drenagem urbana, as inundações, erosão, deslizamento de terra e enchentes. Portanto, a elaboração deste trabalho tem o propósito de apresentar, sob uma perspectiva cientificamente respaldada, a viabilidade de reduzir os problemas de drenagem de maneira não invasiva e eficaz. Considerando que não são empregados muitos tipos de métodos de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) em Juiz de Fora, torna-se imperativo destacar possíveis oportunidades tangíveis para aprimoramentos, soluções que não apenas enfrentam os desafios existentes, mas também levem em consideração as características particulares do cenário local.

Ao adotar uma abordagem inovadora fundamentada cientificamente, este trabalho visa não só preencher uma lacuna no conhecimento, mas também oferecer orientações práticas para a implementação de medidas eficazes e ambientalmente responsáveis. A importância desta pesquisa reside na sua capacidade de impactar positivamente as práticas de planejamento urbano, contribuindo para a criação de ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes.

1.2. Organização do texto

Este trabalho de conclusão de curso é composto por 6 capítulos, o presente capítulo, que trata de uma introdução ao tema e a relevância deste, bem como a justificativa para sua realização e a organização do trabalho.

No segundo capítulo são descritos os objetivos geral e objetivos específicos da pesquisa.

O terceiro capítulo é constituído do referencial teórico, abordando aspectos relevantes e atuais relacionados à drenagem urbana e, mais especificamente, às técnicas compensatórias, que se dividem em técnicas compensatórias em drenagem não-estruturais e técnicas compensatórias em drenagem estruturais, sendo descritas de forma detalhada. O referencial teórico traz ainda uma breve explicação sobre os softwares utilizados.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada. São apresentados os passos realizados os softwares adotados, e as etapas realizadas para a modelagem hidráulica-hidrológica, visando duas aplicações: análise da drenagem urbana na bacia hidrográfica PA BD 47 (bairro centro, em Juiz de Fora, Minas Gerais) sem métodos compensatórios de drenagem e com os métodos compensatórios de drenagem.

O quinto capítulo é uma exposição dos dados recolhidos do software utilizado, analisando-se e discutindo-se os possíveis impactos da aplicação das técnicas compensatórias na bacia em estudo.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados expostos no capítulo anterior.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem o objetivo geral de utilizar o software SWMM para modelar o escoamento superficial da Bacia Hidrográfica PA BD 47, altamente

urbanizada, localizada na cidade de Juiz de Fora, sem métodos compensatórios de drenagem e com os métodos compensatórios de drenagem e fazer uma comparação dos dados retornados pelo programa, de forma a avaliar a efetividade das técnicas empregadas.

2.2. Objetivos específicos

Modelar a bacia hidrográfica em análise, PA BD 47, no software SWMM, em sua situação atual, simular o escoamento na bacia e recolher os dados.

Inserir os métodos compensatórios de drenagem telhado verde, trincheira de infiltração e pavimento permeável, simular o escoamento na bacia e recolher os dados.

Comparar os dados de escoamento superficial produzidos pelo programa SWMM da bacia em questão sem os métodos compensatórios de drenagem e com os métodos compensatórios de drenagem, avaliando a influência que a implantação dessas técnicas causará no escoamento da bacia.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico que abrange a temática discutida neste estudo. São expostos tópicos relativos à gestão de águas pluviais e aos desafios associados à inundação nas áreas urbanas. São apresentados também os métodos compensatórios de drenagem e as plataformas computacionais empregadas para desenvolvimento da análise proposta.

3.1. Drenagem urbana

A atividade humana, ao modificar o uso e ocupação do solo, provoca processos que prejudicam a qualidade do ambiente, tanto natural quanto construído. A urbanização destaca-se como uma das principais atividades humanas causadoras

de impacto, gerando consequências adversas devido às mudanças nas características originais do solo. O rápido crescimento urbano intensificou consideravelmente os problemas de enchentes e inundações urbanas, devido à remoção da cobertura vegetal, aumento da impermeabilização e implementação de obras de canalização (MIGUEZ *et al.*, 2015).

Para Tucci (2008), os problemas de inundações são causados por algumas ações, citadas a seguir:

- Inexistência de restrições quanto à ocupação de áreas de risco de inundação no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano das cidades.
- Invasão de áreas ribeirinhas, propriedade do poder público, por parte da população de baixa renda.
- Ocupação de áreas de médio risco, menos frequente, mas que, quando ocorre inundação, resulta em prejuízos significativos.

Vale destacar que, para Miguez *et al*. (2015), além das enchentes e inundações, a urbanização sem devido planejamento pode resultar em alterações em parcelas do ciclo hidrológico, são essas alterações: redução da intercepção, redução da evapotranspiração, redução do armazenamento superficial, redução da infiltração e recarga dos lençóis subterrâneos e aumento do volume de escoamento superficial.

A solução proposta para atenuar os problemas mencionados concentra-se na captação, condução e rápida liberação de esgotos e águas pluviais, acompanhada muitas vezes da retificação e canalização dos cursos d'água existentes e construção de avenidas sanitárias, ou seja, avenidas em fundo de vale margeando os cursos d'água. Surge, assim, o conceito higienista associado à drenagem urbana. Originado historicamente de um processo que visava melhorar as condições de salubridade nas cidades, esse conceito perdurou até a década de 1970, quando as cidades começaram a enfrentar grandes enchentes, revelando a insustentabilidade dessa abordagem (MIGUEZ *et al.*, 2015).

A comparação entre o conceito higienista, historicamente enraizado, e o paradigma que emergiu nos anos 1970 revela uma mudança crucial no entendimento da drenagem urbana. A transição para uma abordagem mais moderna e sustentável reconheceu as limitações da canalização isolada e propôs medidas que tratam das

causas fundamentais das inundações. Essa mudança de perspectiva, enfatizando a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos urbanos, não apenas revolucionou a abordagem à drenagem, mas também delineou a necessidade de práticas mais eficazes e equilibradas.

Uma abordagem sustentável para os sistemas de drenagem tornou-se um desafio crucial, a atenção precisava se deslocar da rede de canais, que absorvia as consequências do processo de urbanização, para abordar diretamente a origem do problema: o aumento da geração de escoamento. Assim, o controle na fonte, abordando as causas das enchentes e priorizando medidas de reservação e infiltração, emergiu como uma alternativa inovadora (MIGUEZ *et al.*, 2015).

3.2. Desafios da drenagem urbana no Brasil e em Juiz de Fora

O serviço de drenagem urbana no Brasil, que geralmente é realizado pelas prefeituras, enfrenta desafios devido a singularidade de cada região, sendo eles no âmbito financeiro, geológico e/ou estrutural. Diferente de outros projetos da área de saneamento básico, onde as estimativas de cálculo são tangíveis, nos projetos de drenagem urbana existem incertezas no que diz respeito ao tempo de retorno e magnitude das precipitações. Além dessas dificuldades, inerentes ao serviço de drenagem urbana, existem outros pontos que desafiam a implementação deste serviço. Pode-se citar aqui a ausência de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (abnt) referentes à drenagem das águas pluviais em logradouros públicos. Somente as instalações de águas pluviais prediais possuem norma (NBR 10.844/1989). A legislação federal determina que estados e municípios devem estabelecer normas para o manejo de águas pluviais. Logo, observa-se a ausência de uma padronização e de estabelecimento de critérios claros.

Em termos de infraestrutura de drenagem urbana existente no Brasil, predomina o sistema separador absoluto, onde as águas pluviais são coletadas separadas do esgotamento sanitário. Esse modelo é utilizado em 43,5% dos municípios brasileiros. Já 12% declaram utilizar o sistema unitário, onde as águas pluviais são captadas na mesma tubulação que o esgoto. O uso do sistema combinado (separador em alguns pontos e unitário em outros) ocorre em 22% dos municípios

brasileiros. Em 17% dos municípios ocorre a ausência de sistemas de drenagem (SNIS, 2022).

Uma das técnicas compensatórias mais utilizadas no Brasil atualmente são as bacias de inundação. As bacias têm o efeito de amortecimento de cheia: recebem as águas pluviais, enchem e evitam que outras regiões sejam alagadas. Posteriormente, essa água é novamente descarregada. Menciona-se, como exemplo, a construção do piscinão Jaboticabal, na Região Metropolitana de São Paulo, que teve início em 2021 com previsão de ser finalizada no segundo semestre de 2024. Construída no km 13 da Rodovia Anchieta, no encontro dos Ribeirões dos Couros e dos Meninos, entre os municípios de São Caetano do Sul, São Bernardo do Campo e a cidade de São Paulo, essa bacia tem o objetivo de atender mais de 500 mil famílias que moram no entorno e sofrem com alagamentos e inundações em épocas de chuva. Com a capacidade de armazenar 900 mil metros cúbicos de água pluvial, esse será o maior piscinão do estado de São Paulo. Em 2017, segundo reportagem publicada no jornal Estado de Minas, a cidade de São Paulo possuía 24 desses reservatórios (ESTADO DE MINAS, 2017).

Em Juiz de Fora, as iniciativas para aprimorar o sistema de drenagem estão gradualmente ganhando destaque. A lei complementar 29/2015, art. 3°, torna obrigatória a construção de sistema de captação de água de chuva em terrenos que possuam telhados e cobertura com área igual ou superior à 120 metros quadrados. Em 2021 a Prefeitura de Juiz de Fora contratou um financiamento de 100 milhões do programa Finisa (Financiamento à Infraestrutura e ao Saneamento), sendo 50% deste valor destinado para obras de pavimentação e drenagem. Este financiamento já proporcionou a realização de diversas intervenções na cidade, como a remodelação da rede de drenagem de ruas da cidade, limpeza do rio Paraibuna e afluentes e obras de drenagem pluvial na várzea de Benfica.

Recentemente, aprovou-se a Lei 14.642, de junho de 2022, que estabelece a implementação do programa "Bueiro Inteligente". Esse programa visa instalar cestos coletores em bueiros e bocas de lobo, aos quais retêm resíduos sólidos, como lixo e folhas, que poderiam obstruir o fluxo da água nas tubulações de microdrenagem. A proposta é que os chamados “bueiros inteligentes” possuam um

sistema eletrônico de monitoramento que emite alertas quando estão cheios, sinalizando a necessidade de limpeza ao órgão competente.

Está em andamento, também no município de Juiz de Fora, uma obra no Parque da Lajinha, onde o lago está sendo adaptado para atuar como uma bacia de detenção. Para essa finalidade, o nível do lago foi reduzido em 70 centímetros abaixo de seu limite natural. Essa medida visa a armazenar uma quantidade específica de água durante os períodos de chuvas intensas, contribuindo para reduzir o volume de água que flui para o córrego em Santa Luzia.

A primeira revisão do Plano de Saneamento Básico de Juiz de Fora, de 2022, que indica a elaboração do Plano de Drenagem para 2023, destaca a importância da implementação das técnicas compensatórias de drenagem em complementação às obras de drenagem convencional, como adoção de pavimentação permeável e/ou porosa, implantação de valas e trincheiras drenantes, reservatórios locais de acumulação de água de chuva. O Plano sugere também um ponto importante, que consiste na criação de um instrumento de cobrança específico para serviços de drenagem. Vale ressaltar que existe em Juiz de Fora um plano de drenagem específico para a Zona Norte. (JUIZ DE FORA, 2012). No Brasil não é comum a existência desse tipo de cobrança. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apontam que em 2021, apenas 24 municípios declararam realizar essa cobrança (SNIS, 2021). Em Juiz de Fora, a partir de junho de 2022 foi iniciada a cobrança de uma taxa de 4% sobre o valor da conta de abastecimento de água e esgotamento sanitário da Companhia de Saneamento Municipal (Cesama). Esse valor será destinado ao Fundo Municipal de Saneamento, podendo ser utilizado em obras de saneamento básico, dentre elas a drenagem urbana.

No Brasil, os aspectos relativos ao controle quantitativo das enchentes ainda consistem na principal preocupação, enquanto nos países desenvolvidos as questões de drenagem urbana estão concentradas na qualidade da água coletada, uma vez que práticas associadas ao controle de inundações apresentam-se em estágio avançado (CANHOLI, 2014). No Brasil, o tratamento das águas pluviais não é comum, uma vez que apenas 4% dos municípios declaram realizar algum tipo de tratamento (SNIS, 2022).

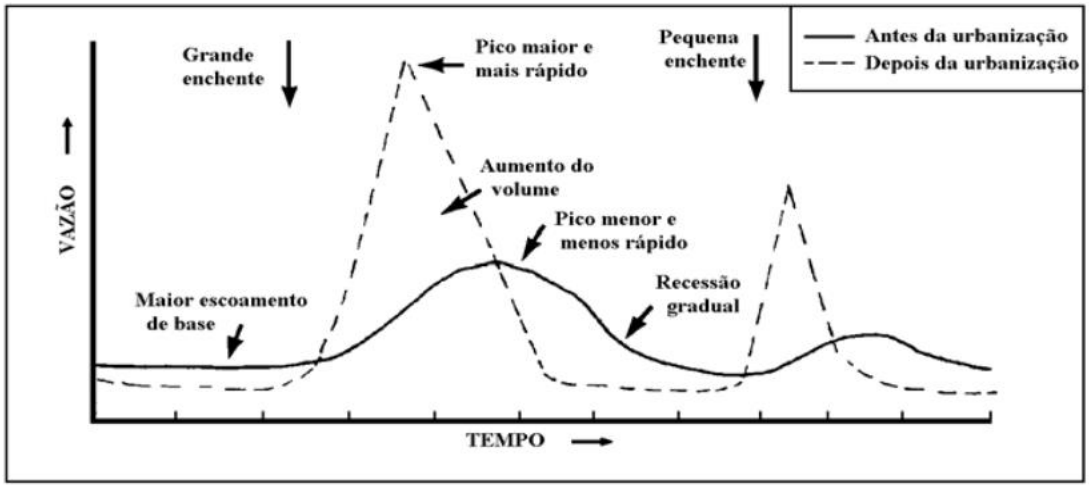
Conforme apresentado, há não apenas propostas de implementação de diversas soluções para amenizar os problemas de drenagem urbana, mas também obras tangíveis em andamento. Embora ainda distantes de resolver por completo os desafios atuais, o país está avançando com uma consciência mais clara do que é essencial para lidar com essa questão.

3.3. Métodos compensatórios de drenagem

Os avanços na hidrologia urbana e no controle de inundações ressaltam a aplicação de medidas compensatórias na drenagem urbana como fundamental para o desenvolvimento sustentável das cidades. Diversas propostas de projetos urbanos têm surgido com o intuito de mitigar os impactos das abordagens higienistas anteriormente predominantes (MIGUEZ *et al*., 2015).

As medidas compensatórias de drenagem, que tem como principal atributo manter as águas pluviais no local da precipitação, visam solucionar os problemas causados pelo processo de urbanização reintroduzindo características como maior escoamento de base, picos menos intensos e mais lentos, e recessão gradual, como destacado por Tucci *et al.* (2005), conforme ilustrado na Figura 1 ."

Figura 1- Comparação da vazão antes e depois da urbanização.



Fonte: Tucci *et al.* (2015).

As estratégias delineadas pelo método compensatório abarcam a totalidade da bacia hidrográfica, contemplando o processo completo de urbanização.

Essas soluções visam não apenas mitigar, mas compreender e resolver os desafios derivados desse processo.

Na Figura 2, conforme exposto por Canholi (2014), é realizada uma comparação entre as funções dos conceitos de canalização, uma abordagem amplamente utilizada, e de reservação, um método que está sendo cada vez mais explorado. Observa-se que o conceito de reservação baseia-se na contenção temporária das águas pluviais, em detrimento da remoção rápida predominante no modelo convencional baseado na canalização. Para se realizar a contenção das águas, podem ser utilizados reservatórios, superficiais, subsuperficiais e subterrâneos. Sua aplicação pode ser realizada tanto em áreas novas, quanto em locais já construídos.

Figura 2- Comparação entre sistemas de drenagem baseado na canalização e na detenção.

CARACTERÍSTICA	CANALIZAÇÃO	RESERVAÇÃO
Função	Remoção rápida dos escoamentos	Contenção temporária para subsequente liberação
Componentes principais	Canais abertos/galerias	Reservatórios a superfície livre Reservatórios subterrâneos Retenção subsuperficial
Aplicabilidade	Instalação em áreas novas Construção por fases Ampliação de capacidade pode se tornar difícil (centros urbanos)	Áreas novas (em implantação) Construção por fases Áreas existentes (à superfície ou subterrâneas)
Impacto nos trechos de jusante (quantidade)	Aumenta significativamente os picos das enchentes em relação à condição anterior Maiores obras nos sistemas de jusante	Áreas novas: podem ser dimensionadas para impacto zero (Legislação EUA) Reabilitação de sistemas: podem tornar vazões a jusante compatíveis com capacidade disponível
Impacto nos trechos de jusante (qualidade)	Transporta para o corpo receptor toda carga poluente afluente	Facilita remoção de material flutuante por concentração em áreas de recirculação dos reservatórios e dos sólidos em suspensão, pelo processo natural de decantação
Manutenção/ operação	Manutenção em geral pouco frequente (pode ocorrer excesso de assoreamento e de lixo) Manutenção nas galerias é difícil (condições de acesso)	Necessária limpeza periódica Necessária fiscalização Sistemas de bombeamento requerem operação/manutenção Desinfecção eventual(insetos)
Estudos hidrológicos/ hidráulicos	Requer definição dos picos de enchente	Requer definição dos hidrogramas (volumes das enchentes)

Fonte: Canholi (2014).

Conforme citado anteriormente, segundo Baptista *et al.* (2005), as técnicas compensatórias são divididas em dois grupos, as técnicas compensatórias não estruturais e as técnicas compensatórias estruturais, apresentadas nos subitens a seguir para expandir o conhecimento sobre esse assunto e oferecer uma análise mais aprofundada das abordagens.

3.3.1. Técnicas compensatórias não estruturais.

As técnicas compensatórias não-estruturais compreendem estratégias que não envolvem a construção de infraestruturas físicas para o controle de águas pluviais. Para Baptista *et al.* (2005), essas estratégias incluem:

- Retardamento dos escoamentos: Essa técnica prioriza a redução da velocidade do escoamento das águas pluviais, utilizando a adoção de revestimentos de canais e pavimentos com superfícies mais rugosas. Isso ajuda a diminuir a velocidade e o volume de água que flui para os sistemas de drenagem, evitando sobrecargas.
- Racionalização da ocupação do solo urbano: Envolve práticas urbanísticas que limitam a impermeabilização do solo, como a não conexão direta de áreas impermeáveis ao sistema de drenagem. Essa abordagem visa preservar as áreas permeáveis e reduzir o escoamento superficial, permitindo maior infiltração da água no solo.
- Princípios de prevenção e educação ambiental: Envolvem ações educativas e de conscientização da população sobre os impactos do aumento do volume e velocidade do escoamento superficial. Isso inclui campanhas de sensibilização para reduzir a impermeabilização do solo e o descarte inadequado de resíduos, incentivando práticas sustentáveis no uso da água e no manejo de resíduos urbanos.

Tucci *et al.* (2004) acrescentam outras estratégias a esta lista, que são:

- Estratégias construtivas anti alagamento: conjunto de medidas destinadas a minimizar os danos em construções localizadas em áreas sujeitas a inundações.

- Seguro: providência voltada para garantir uma proteção financeira contra possíveis perdas ocasionadas por eventos de inundação.
- Sistemas de alerta antecipado: conjunto de procedimentos que envolvem coleta de dados em tempo real, transmissão para um centro de análise, previsões imediatas baseadas em modelos matemáticos e um plano de defesa, permitindo ações preventivas diante de situações de risco

3.3.2. Técnicas compensatórias estruturais.

As técnicas compensatórias estruturais são soluções físicas implementadas para gerenciar o escoamento de água pluvial de forma sustentável, reduzindo a sobrecarga no sistema convencional de drenagem e minimizando os impactos das chuvas intensas nas áreas urbanas. São medidas que ainda não se encontram disseminadas no Brasil e se diferem do modelo tradicionalmente abordado nos projetos de drenagem urbana adotados no país.

Estas técnicas, segundo Baptista *et al.* (2005), podem ser classificadas considerando diferentes critérios. Uma forma de classificação é baseada no princípio de funcionamento, que compreende infiltração e retenção, podendo haver uma combinação de ambos. Outro critério de classificação, considerado pelos autores como mais realista em termos de sistematização, é de acordo com a posição de implantação do dispositivo.

- Técnicas para controle na fonte: temos como exemplo os poços de infiltração, as valas de armazenamento e/ou infiltração e micro reservatórios individuais. Esses são instalados em unidades individuais de terreno ou em pequenos agrupamentos de terrenos, correlacionando-se, portanto, a áreas de drenagem menores.
- Técnicas lineares: geralmente instaladas ao longo de sistemas viários, como pátios, estacionamentos e arruamentos, com uma ampla gama de áreas de drenagem associadas. Dentro desse grupo, encontram-se os pavimentos porosos, que podem ou não possuir dispositivos de infiltração, assim como as valas de detenção e/ou infiltração e as trincheiras de infiltração.

- Técnicas para controle centralizado: compreendem as bacias de detenção e retenção, geralmente aplicadas em áreas de drenagem de maior porte. Essas estruturas possuem diferentes configurações, podendo incluir armazenamento e infiltração ou não. Existem bacias focadas apenas no armazenamento (retenção e detenção), outras exclusivamente na infiltração e ainda aquelas que combinam ambas as funções (retenção e infiltração).

Um resumo das técnicas compensatórias não estruturais e estruturais é apresentado na Tabela 1, baseadas numa combinação entre características geométricas e sua forma de utilização:

Tabela 1 - Categorização dos diferentes tipos de técnicas compensatórias.

<table>
<tr><td rowspan="1">Técnicas compensatórias não-estruturais</td><td colspan="3">Legislação
Racionalização do uso do solo urbano
Educação ambiental
Tratamento de fundo de vale</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Técnicas compensatórias estruturais</td><td rowspan="1">Bacias</td><td colspan="2">Detenção e Retenção
Infiltração
Detenção/Retenção e Infiltração</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Obras lineares</td><td colspan="2">Trincheiras
Valas e Valetas</td></tr>
<tr><td>Pavimentos</td><td>Revestimentos permeáveis
Pavimentos reservatórios</td></tr>
<tr><td>Obras pontuais</td><td colspan="2">Poços de Infiltração
Telhados
Técnicas adaptadas à parcela</td></tr>
</table>

Fonte: Adaptado de Baptista *et al.* (2005).

A seguir, algumas das técnicas compensatórias estruturais serão individualmente apresentadas, acompanhadas de explicações, definições e exemplos.

3.3.2.1. Telhados verdes

Os telhados verdes são sistemas construtivos aplicados sobre edificações, compostos por várias camadas, incluindo membrana impermeabilizante, drenagem, substrato e plantas. Podem ser pré-fabricados ou montados no local, dependendo do projeto. Existem dois tipos principais: extensivos, com substrato mais leve, e intensivos, que possuem camadas mais espessas de substrato.

Algumas das vantagens dos telhados verdes destacadas por Prince (1999) são a melhoria da qualidade do ar, temperaturas mais baixas, podem ser alcançadas maiores umidades relativas do ar por meio da evaporação natural, parte da precipitação pode ser armazenada. A Figura 3 mostra um projeto utilizando telhado verde e a Figura 4 mostra as camadas para a sua construção.

Figura 3 - Camadas de um telhado verde.

Fonte: https://carluc.com.br/arquitetura/telhado-verde/

Figura 4 - Telhado verde.

Fonte: https://ecotecnologias.org/?page_id=561.

3.3.2.2. Jardins de chuva

Os jardins de chuva, além de serem dispositivos de drenagem, também são estruturas paisagísticas, assim como os telhados verdes. São projetados para capturar, filtrar e absorver as água da chuva. São áreas que recebem o direcionamento de calçadas, telhados e áreas impermeabilizadas, onde a água pluvial é retida e infiltrada no solo. A Figura 6 apresenta um modelo esquemático de jardim de chuva.

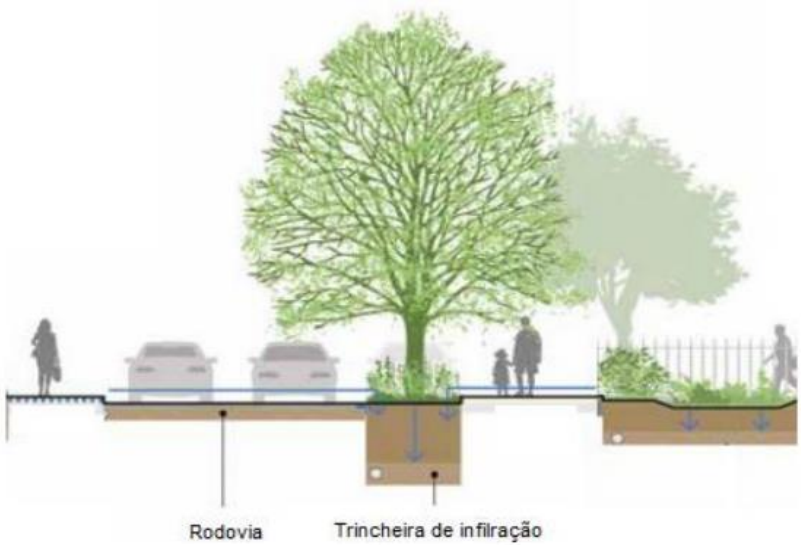
Figura 5 - Demonstração de um jardim de chuva.

Fonte: https://usegreenco.com.br/blogs/pense-mais-verde/jardins-de-chuva-ideiasustentavel-que-salva-comunidades-e-meio-ambiente

3.3.2.3. Trincheiras de Infiltração

Esses dispositivos funcionam escavando valas preenchidas com material permeável, como pedras ou cascalho, permitindo que a água das chuvas seja armazenada temporariamente e infiltre no solo lentamente. São normalmente utilizados ao longo de vias, estradas, áreas de estacionamento e zonas residenciais, entre outros locais. A Figura 6 apresenta um esquema de trincheira de infiltração construída às margens de uma via pública.

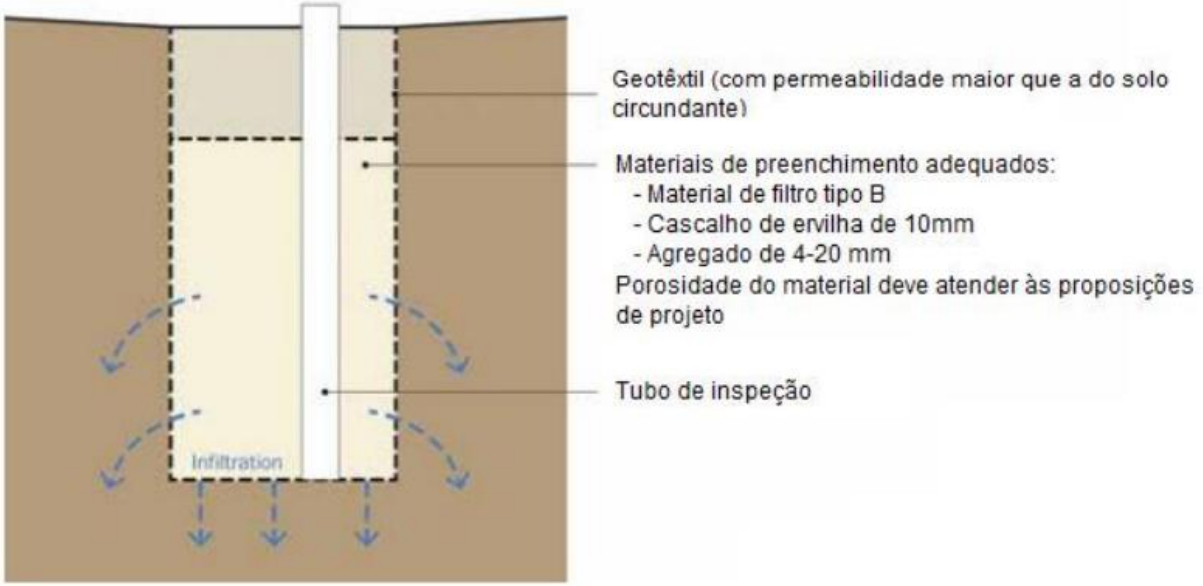
Figura 6 - Trincheira de infiltração às margens de uma rodovia.



Fonte: Adaptado The SuDS Manual. 2015. p 191

As trincheiras direcionam o fluxo de áreas próximas e facilitam a infiltração ao longo de sua extensão. Após chuvas intensas, o nível de água aumenta e, devido à infiltração mais lenta, permanece acumulado por um tempo. Funciona, de fato, como um reservatório de detenção, pois a quantidade de água que drena para a vala excede sua capacidade de infiltração. Em períodos com pouca chuva ou secos, a estrutura permanece seca (TUCCI *et al*., 2003). A Figura 7 apresenta a visão em corte de uma trincheira.

Figura 7 - Visão em corte de uma trincheira de infiltração.



Fonte: Adaptado The SuDS Manual. 2015. p 259

Para Prince (1999), a rota de escoamento superficial das águas pluviais além da capacidade da vala precisa ser identificada e avaliada. É necessário providenciar um sistema de *overflow* que direcione para um canal ou curso d'água estabilizado, com medidas para garantir um fluxo que não cause erosão.

3.3.2.4. Microrreservatórios

Este dispositivo acumula a água, diminuindo a velocidade de escoamento e o volume durante as chuvas, depois libera gradualmente a água armazenada. São reservatórios construídos como pequenas bacias, valas ou câmaras

subterrâneas, localizadas estrategicamente para capturar o escoamento de superfícies impermeáveis, tais como, calçadas e telhados.

A implantação dos poços pode ser feita manual ou mecanicamente, deve ser evitada a presença de finos e técnicas que utilizam lubrificantes, que facilitam a entrada de poluição. O controle das dimensões, qualidade dos materiais e capacidade de descarga são essenciais na execução desses dispositivos (Baptista *et al.*, 2005). A Figura 8 apresenta um exemplo de reservatório residencial, para a captação da água pluvial escoada pelo telhado. Essa água pode ser aproveitada para fins menos nobres, como lavagem de carros, rega de jardins, lavagem de quintal, etc. Assim, além de contribuir com a redução do pico da vazão de drenagem, também auxilia na redução do consumo de água potável proveniente do sistema de abastecimento de água.

Figura 8 - Microrreservatório.

Fonte: http://www.agua-de-chuva.com/brazil/index.php.

3.3.2.5. Pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis de drenagem são sistemas que permitem a passagem da água, ou seja, são estruturas nas quais a água da chuva infiltra através do pavimento, ao invés de escoar pela superfície.

Baptista *et al.* (2005), identificam três níveis diferentes de atuação dos pavimentos, os dotados de revestimento superficial permeável, os pavimentos dotados de estrutura porosa e aqueles que são dotados de estrutura porosa e de

dispositivos de facilitação da infiltração. A Figura 9 apresenta diferentes possibilidades de pavimentos permeáveis

Figura 9a - Pavimento permeável: placas cimentícias permeáveis.

Fonte: https://projetobatente.com.br/quatro-tipos-depavimentacoes-permeaveis/

Figura 9b - Pavimento permeável: concregrama.

Fonte: https://www.cassol.com.br/lajota-concregramacinza-40x40-machado-pre-moldados/p

Figura 9c - Pavimento permeável: piso intertravado.

Fonte:ttps://www.escolaengenharia.com.br/pisointertravado/

Figura 9d - Pavimento permeável: pneu reciclado.

Fonte: https://projetobatente.com.br/quatro-tipos-depavimentacoes-permeaveis/

3.3.2.6. Bacias de detenção

São estruturas ou áreas destinadas a reter temporariamente o escoamento de águas pluviais, geralmente construídas para controlar o volume de água durante chuvas intensas. Elas retêm a água por um período limitado e, em seguida, liberam gradualmente o excesso para o sistema de drenagem, evitando picos

de inundação. Podem ser utilizadas também como espaços de lazer, integradas à paisagem urbana. A Figura 10 apresenta um exemplo de bacia de detenção combinada à pista de caminhada em Belo Horizonte.

Figura 10 - Bacia de detenção combinada à pista de caminhada.

Fonte: http://pbh.gov.br/combate_inundacoes/Plano_de_Acoes_de_Combate_a_Inundacoes_em_BH_.pdf

Estes reservatórios ou bacias apresentam vantagens e desvantagens, conforme apontado por Urbonas e Stahre (1993): custos reduzidos quando comparados a uma grande quantidade de controles distribuídos; menor custo de operação e manutenção; facilidade na gestão da construção; dificuldade na identificação de locais apropriados; custo de aquisição da área; e oposição da população a reservatórios de grande porte.

4. METODOLOGIA

Na fase inicial deste estudo, uma revisão bibliográfica sobre drenagem urbana e suas técnicas compensatórias foi conduzida, o que proporcionou informações pertinentes para a integração de alternativas aos sistemas convencionais existentes.

Para realização deste trabalho foi selecionada uma sub-bacia altamente urbanizada na região central do município de Juiz de Fora, com o intuito de avaliar a viabilidade de um sistema de drenagem composto por técnicas compensatórias.

- **Software utilizados**

· **QGIS:** O QGIS, ou Quantum GIS, é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto, ou seja, é gratuito e pode ser usado por todos que tenham interesse em suas funcionalidades. Tem uma ampla versatilidade e compatibilidade processando dados geoespaciais, como vetores, rasters e base de dados.

O software está em constante atualização devido a uma grande comunidade de desenvolvedores que contribuem expandindo suas funcionalidades, que se estendem desde análises ambientais à planejamento urbano.

· **SWMM 5.2:** O SWMM (Storm Water Management Model), da EPA, é um programa de modelagem dinâmica que simula a qualidade e quantidade do escoamento superficial. De acordo com o manual do programa ele opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos e cargas poluidoras. O SWMM acompanha o escoamento, vazão, altura de escoamento, e qualidade da água dentro de cada sub-bacia, durante um período de simulação que pode ser um único evento ou contínuo a longo prazo.

O software foi desenvolvido em 1971 e sofreu várias atualizações desde então, inclusive a modelagem do desempenho hidrológico dos métodos compensatórios de drenagem: valas de infiltração, cisterna, telhados verdes, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e pavimento permeável.

Os itens a seguir descrevem os procedimentos realizados.

4.1. Área de estudo

A bacia PA BD 47 escolhida localiza-se no município de Juiz de Fora, situado na Zona da Mata de Minas Gerais, a uma distância aproximada de 125 Km da capital, Belo Horizonte. Juiz de Fora abrange uma área de 1.435,75 km² e tem uma população estimada de 540.756 habitantes, de acordo com o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022).

Juiz de Fora destaca-se por ser um centro educacional significativo, abrigando diversas instituições de ensino superior e muitas atividades culturais e econômicas na região, além de ter uma relevância populacional significativa. Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pela escolha de uma bacia hidrográfica com alto índice de urbanização, localizada no bairro Centro, uma área de alta relevância economica para o município. A bacia PA BD 47 preenche este requisito. Na Figura 11, pode-se observar a área da bacia, cujos limites estão traçados em amarelo.

Figura 11 - Limite da bacia PA BD 47, em amarelo.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2. Modelagem QGIS

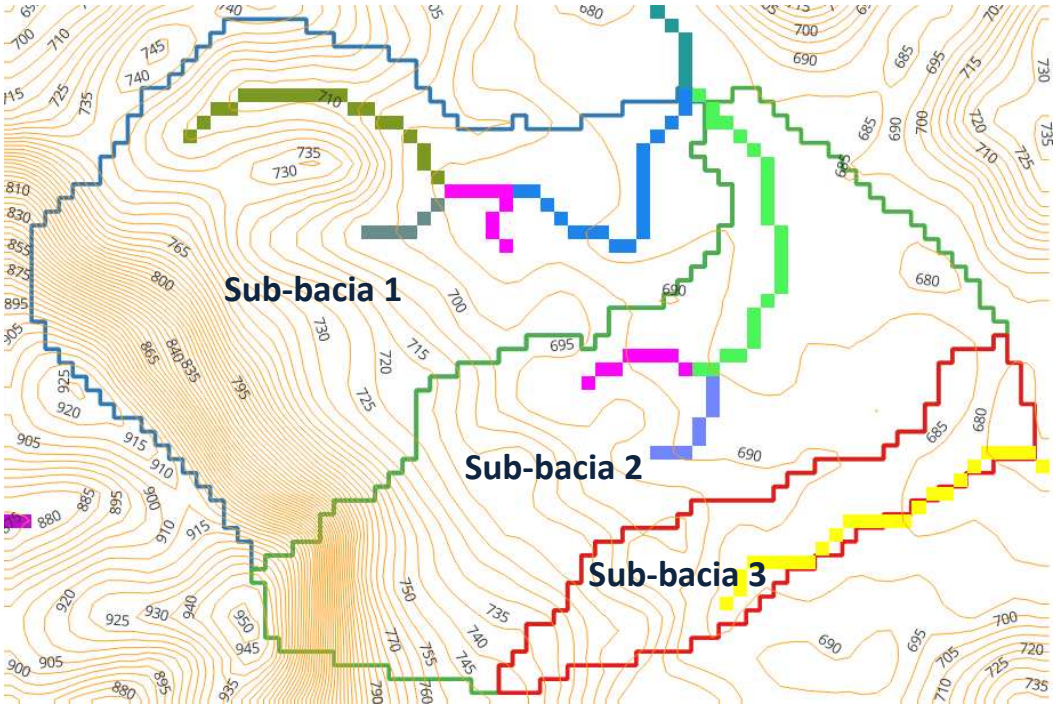
A modelagem da bacia PA BD 47 no software QGIS visa a obtenção dos dados de entrada para a modelagem no software SWMM.

Foram obtidos os dados do MDE (Modelo Digital de Elevação) através do site TOPODATA, do INPE, zona 21S435, que é a área de estudo e também, através do site da prefeitura de Juiz de Fora, o arquivo do tipo *shapefile* no qual consta a delimitação do município e de todas as suas sub-bacias.

No QGIS foi adicionada a camada do município de Juiz de Fora e recortada apenas a bacia PA BD 47, do arquivo tipo *shapefile*, sistema de referência Sirgas 2000 e a camada *raster* com as informações altimétricas, MDE, que também é salvo no mesmo sistema de referência, o qual é trabalhado, por meio do GRASS, de modo a preencher as inconsistências das imagens, pelo comando *r.fill.*

Com o dado de entrada o arquivo *tif* de fluxo, através do comando *r.watershed*, foram geradas as imagens dos rios que são constituídos na bacia, como é possível observar na Figura 12, onde os corpos d'agua são as linhas em azul, verde, rosa, roxo,cinza e amarelo. Para delinear as sub-bacias, empregou-se o comando *r.water.outlet.* inserindo como dados de entrada o arquivo *tiff* de segmento de fluxo. Com base nessas informações foram definidos os nós e geradas três sub-bacias, como mostrado na Figura 12.

Figura 12- Divisão em três sub-bacias e rios existentes na bacia PA BD 47.



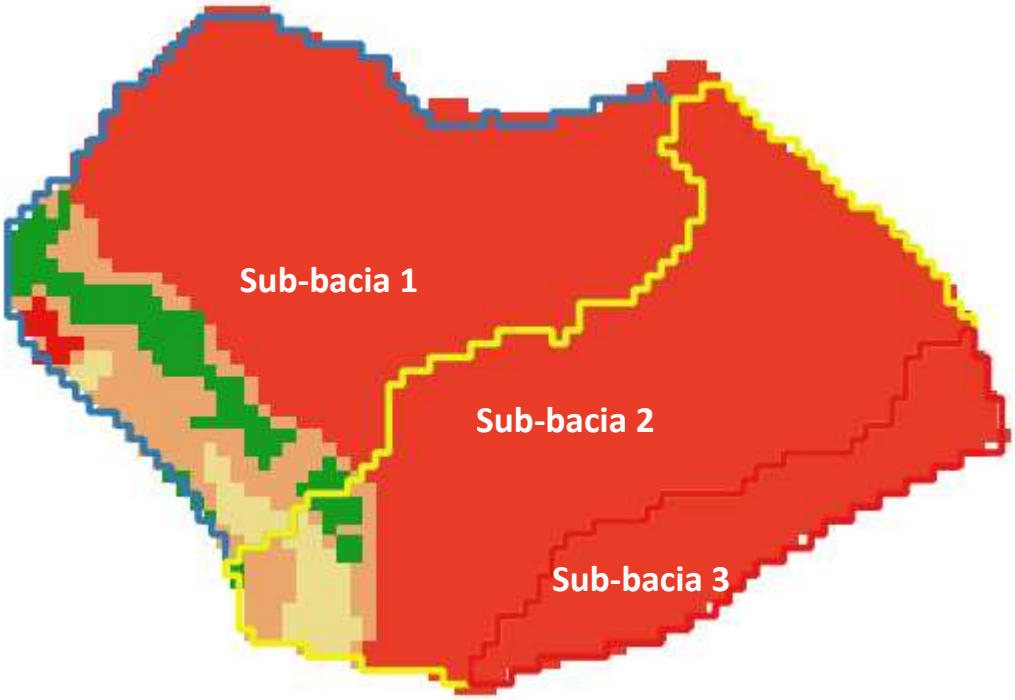
Fonte: Elaborado pela autora.

Os corpos d'gua observados na figura 12, não são observados na figura 11, onde se vê área totalmente urbanizada, o que pode ser consequência tanto de canalização quanto de soterramento destes.

Com base no fluxo, foram escolhidos também os exutórios de cada sub-bacia, a fim de conectá-los para, posteriormente, no SWMM analisar as vazões nas sub-bacias e na bacia.

Através da funcionalidade 'Complementos', no QGIS, encontra-se a funcionalidade MapBiomasCollection, onde é possível observar as áreas de floresta, agropecuária e não vegetada (urbanizada), marcadas em cada sub-bacia, conforme Figura 13, nas cores verde, bege e vermelha, respectivamente.

Figura 13: Tipos de cobertura vegetal da bacia PA BD 47.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com as ferramentas disponíveis no programa, foram calculadas cada área para as sub-bacias, como apresentado na Tabela 2.

As sub-bacias 1, 2 e 3 estão delimitadas em azul, amarelo e vermelho, como é possível observar na Figura 13.

Tabela 2 - Áreas urbanas, de vegetação e de pastagem em cada sub-bacia.

	Sub-bacia 1		Sub-bacia 2		Sub-bacia 3	
	km²	%	km²	%	km²	%
Urbana	0,7599	76,02	0,7333	89,21	0,2492	100,00
Vegetação	0,0811	8,11	0,0135	1,64	0,0000	0,00
Pastagem	0,1587	15,87	0,0752	9,15	0,0000	0,00
Total (km²)	0,9997		0,8220		0,2492	

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS.

Para a implementação de cada um dos métodos compensatórios de drenagem foram estabelecidos critérios de escolha. Devido à abrangência da área de estudo escolhida, que compreendeu uma bacia hidrográfica em sua totalidade, as considerações e cálculos individuais para cada método seriam extensivos demais para este projeto.

- Pavimento permeável:

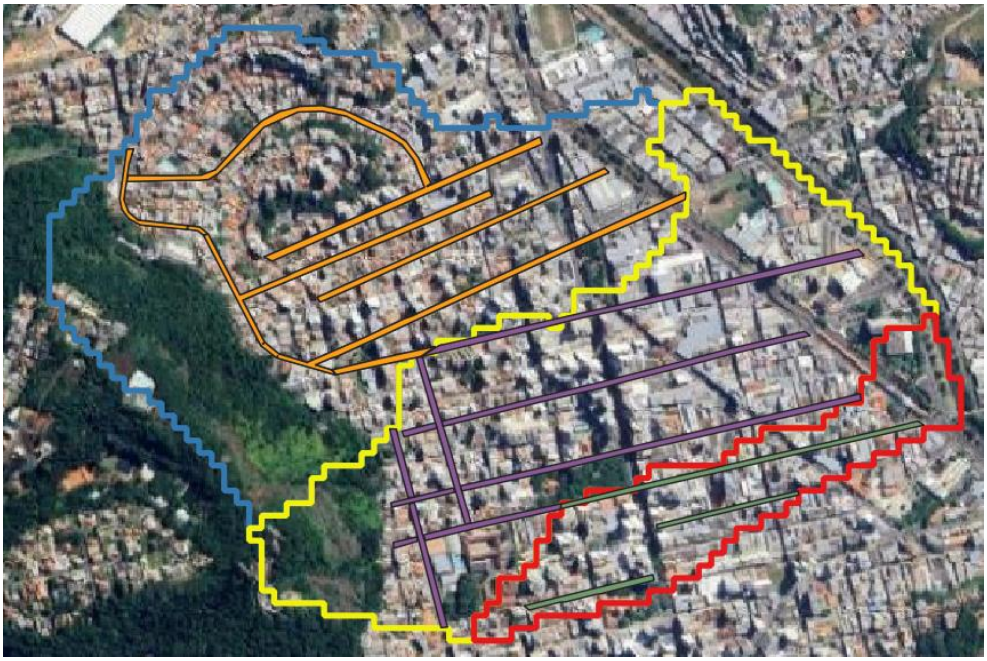
A escolha das vias para implantação do pavimento permeável foi feita com base na proximidade destas com relevos acentuados e também posicionamento na direção da mancha de inundação, conforme mapa de Lima *et al.* (2012), (Anexo 1), com o objetivo de amortecer a velocidade de escoamento das águas pluviais. A ruas selecionadas em cada sub-bacia foram (destacadas em laranja na Figura 14):

Sub-bacia 1: Visconde de Mauá, João Pinheiro, Barão de Cataguases, Luiz Perry, Silva Jardim, Benjamin Constant e São Sebastião.

Sub-bacia 2: Olegário Maciel, Tiradentes, Marchal Floriano Peixoto, Marechal Deodoro e Halfeld.

Sub-bacia 3: Halfeld, São joão Nepomuceno e Fernando Lobo.

Figura 14: Localização do pavimento permeável na bacia PA BD 47



Fonte: Elaborado pela autora.

- Trincheira de infiltração:

O critério de seleção para implementação das trincheiras de infiltração foi baseado na declividade das ruas, observada pelas curvas de nível. As trincheiras de infiltração foram colocadas apenas em ruas não selecionadas para implementação dos pavimentos permeáveis.

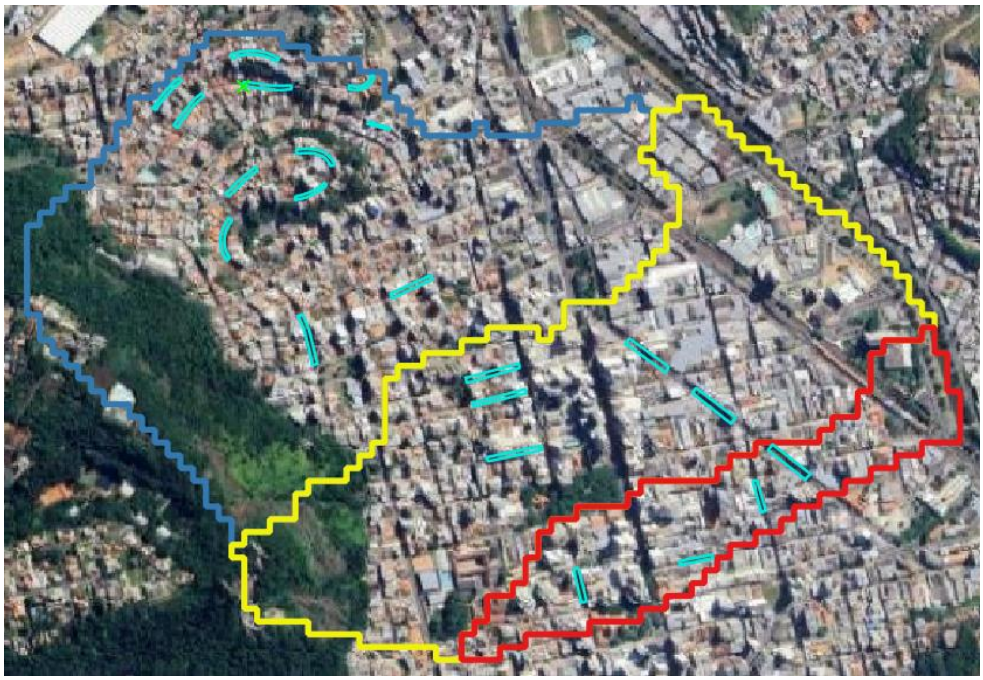
Tendo em vista que o cálculo das dimensões das trincheiras de infiltração envolve procedimentos que estão fora do escopo deste trabalho, foram estabelecidas dimensões padronizadas para esta: 0,6 m de profundidade, 0,6 m de largura e 150m de comprimento. As ruas selecionadas para implantação de trincheira de infiltração em cada sub-bacia foram (destacadas em azul claro na Figura 15):

Sub-bacia 1: Capitão Arnaldo de Carvalho, Quintino Bocaiúva, Da Laguna e Olímpio Reis.

Sub-bacia 2: Pasteur, Oswaldo Cruz, Doutor Constantino Paleta, Getúlio Vargas Bastista de Oliveira.

Sub-bacia 3: Santa Rita, Getúlio Vargas, Batista de Oliveira

Figura 15: Localização das trincheira de infiltração na bacia PA BD 47



Fonte: Elaborado pela autora.

- Telhado verde:

A área de implantação dos telhados verdes foi determinada com a medição dos telhados de casas e edifícios da bacia hidrográfica em estudo por meio da observação feita através do QGIS com a inclusão do *Google Satellite.* Foram escolhidos casas e edifícios que não possuem telhados coloniais. A área superior das edificações não foram consideradas em sua totalidade, apenas edificações que possuem uma área de contribuição superior a 20 m². Edificações que têm impossibilidade de receber a luz solar em todo período do dia, e portanto não propiciar crescimento saudável às plantas, foram descartadas. Foram observados 597 telhados na sub-bacia 1, 563 telhados na sub-bacia 2 e 150 telhados na sub-bacia 3, totalizando 1310 telhados.

A tabela 3 apresenta a distribuição das áreas ocupadas por cada um do métodos compensatórios de drenagem:

Tabela 3- Área ocupada por cada método compensatório nas sub-bacias e área total

Local	**Telhado verde (m²)**	**Pavimento permeável (m²)**	**Trincheira de infiltração (m²)**
Sub-bacia 1	42.268,92	65.865,88	1.080,00
Sub-bacia 2	62.351,85	60.424,81	540,00
Sub-bacia 3	21.430,45	18.367,13	300,00
TOTAL	126.051,22	144.657,82	1.920,00

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS.

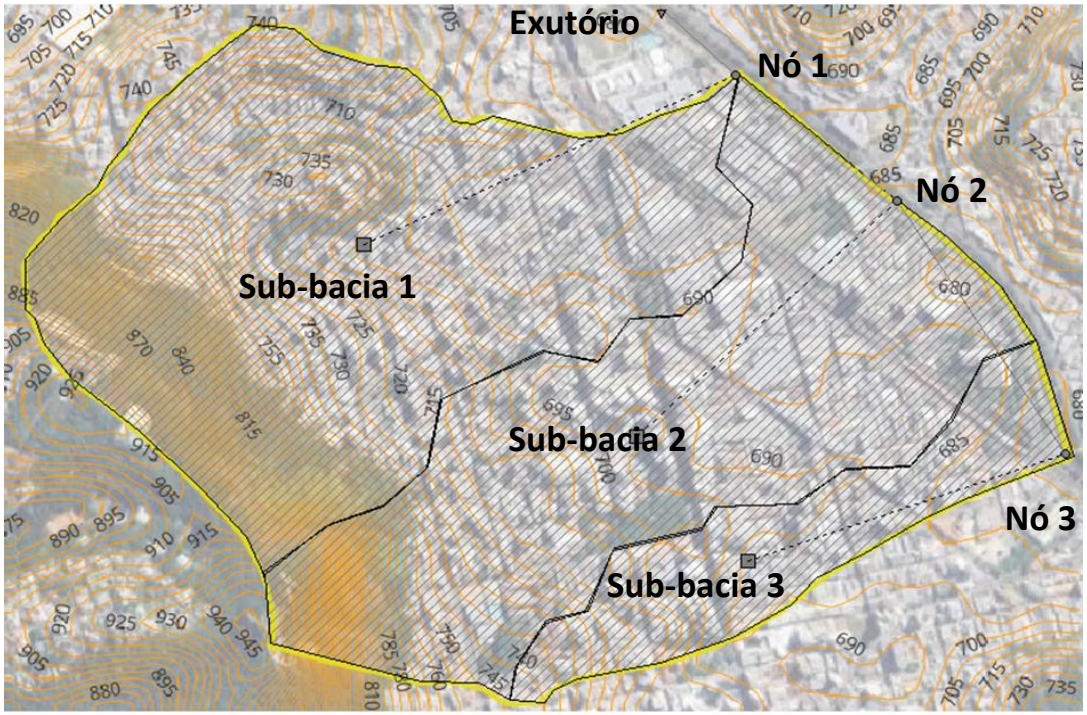
Com a disponibilidade de todos os dados calculados através do software QGIS, deu-se início ao modelo da bacia no SWMM, conforme tópico 4.3 - Modelagem SWMM.

4.3. Modelagem SWMM

No software SWMM, foram inseridos os dados essenciais para modelar a bacia hidrográfica PA BD 47 e simular com precisão o comportamento do escoamento da água.

Para modelar a bacia PA BD 47 foi feito o download da imagem gerada pelo software QGIS do contorno desta bacia hidrográfica e das sub-bacias geradas, pelo comando *add a subcatchment*, foi feito o contorno de cada uma das sub-bacias, em seguida pelo comando *add nodes* foram inseridos os nós em cada sub-bacia (círculo) e o exutorio (triângulo). Pelo comando *add conduits* foram conectados o exutório ao Nó 1; o Nó 1 ao nó 2; e o Nó 2 ao Nó 3, a numeração dos nós foi definida de cima para baixo. Na Figura 16 é possível observar cada um destes itens, sub-bacias, nós, exutório e condutos:

Figura 16 - Divisão da bacia no SWMM definição de nós, condutos e exutório.



Fonte: Elaborado pela autora.

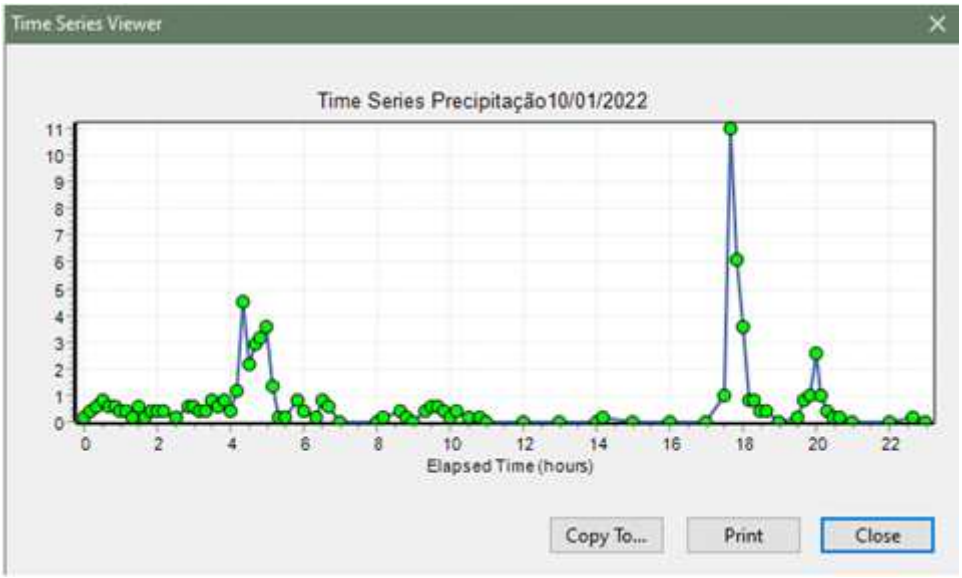
Nas opções de simulação, foram definidos o modelo de infiltração como “Curva Número”, o modelo do processo físico como “Propagação de Fluxo” e o modelo de propagação de fluxo como “Onda Dinâmica”. A data foi definida no dia 10/01/2022. O passo de tempo com relatório a cada 15 minutos. Em onda dinâmica o termo de inércia foi definido como “Dampen”. A equação de perda de carga é de Hazen-Williams. A unidade de vazão utilizada foi CMS (metros cúbicos por segundo).

A definição da data da precipitação foi fundamentada no registro do dia com o maior índice pluviométrico, coincidindo com notícias que evidenciaram o transbordamento do Rio Paraibuna. O fato ocorreu no dia 10 de Janeiro de 2022, quando houve o transbordamento do rio e alagamento de várias ruas. A precipitação que ocorreu em apenas 6h era 10% da prevista para todo o mês de janeiro daquele ano, fazendo com que o nível do Rio Paraibuna atingisse 3,98m e o marco de segunda maior cheia nos últimos 20 anos (ESTADO DE MINAS, 2022).

Os dados desta precipitação foram obtidos através do site do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), onde foram baixados os dados da precipitação da estação pluviométrica São Pedro, 313670213A, durante as 24h do dia 10 de Janeiro, em formato de tabela, inseridos no SWMM e associados à cada sub-bacia. Foram adotados valores da estação São Pedro devido

a falta de dados, nesta data, na estação mais próxima a área de estudo. Através do SWMM, foi possível gerar um gráfico da precipitação ao longo do dia. Pela figura 17, é possível observar que o horário crítico ocorreu entre 17:00h e 19:00h.

Figura 17 - Precipitação x hora no dia 10 de janeiro de 2023, estação 313670213A.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do CEMADEN.

O número de Manning, essencial para estimar a rugosidade das superfícies, e portanto definir a resistência ao fluxo da água, a influência na velocidade e a distribuição do escoamento, foi definido conforme a Figura 18, disponibilizada no manual do *software* SWMM, que se baseia no tipo de cobertura do solo. Assim foi definido n = 0,011 para a porcentagem urbanizada das sub-bacias e n = 0,4 para a área de vegetação e pastagem, nas sub-bacias 1 e 2. Na sub-bacia 3, utilizou-se apenas n = 0,011, devido ao fato de esta ser completamente urbanizada.

Figura 18 - Coeficiente n de Manning - Escoamento à Superfície Livre.

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
• Cobertos de resíduos < 20%	0,06
• Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Grama	
• Curta, pradaria	0,15
• Densa	0,24
• Grama-bermudas	0,41
Floresta	
• Vegetação rasteira leve	0,40
• Vegetação rasteira densa	0,80

Fonte: Manual SWMM 5.0 (2010), p. 170.

O tipo de solo da área em estudo foi encontrado a partir do Mapa de Classe de Solos, disponibilizado no site da prefeitura de Juiz de Fora, pelo Sistema de Informação para o Desenvolvimento Territorial (SISURB), onde foi possível observar que a área de estudo é composta por Latossolos Vermelho-Amarelos, Classe C.

Na Figura 19 se observa a descrição do uso de terra e a classe hidrológica do solo para a definição da “Curva Número”, com valor 90 para as sub-bacias 1 e 2, e valor 98 para a sub-bacia 3.

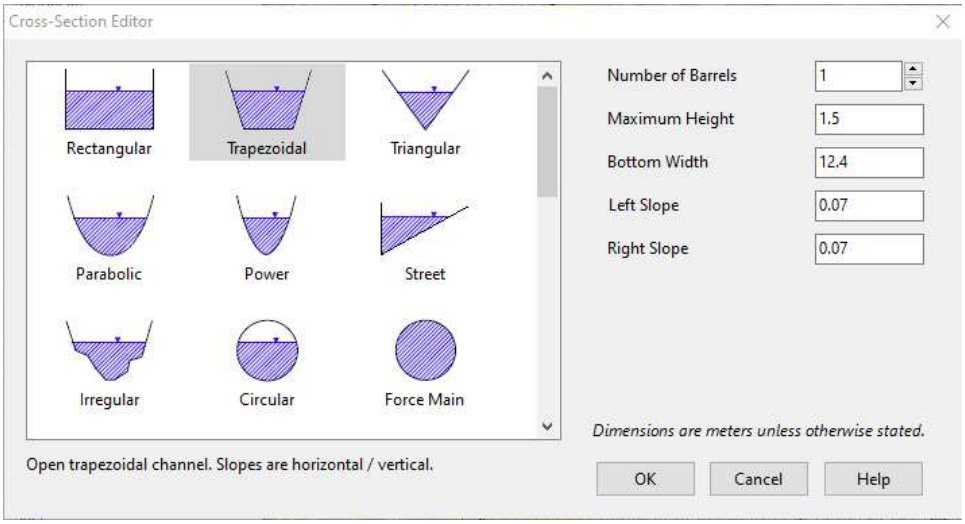
Figura 19 - Relação entre o uso da terra e a classe hidrológica do solo para definição da Curva Número.

	Classes Hidrológicas do Solo - NRCS			
Descrição do Uso de Terra	A	B	C	D
Terra cultivada				
• Sem tratamento para conservação	72	81	88	91
• Com tratamento para conservação	62	71	78	81
Pastagem				
• Condição ruim	68	79	86	89
• Condição boa	39	61	74	80
Campo				
• Condição boa	30	58	71	78
Floresta				
• Densidade baixa, coberturas pobres, sem cobertura	45	66	77	83
• Boa cobertura[2]	25	55	70	77
Espaços abertos, gramados, parques, campos de golfe, cemitérios etc.				
• Condição boa: cobertura de grama em 75% ou mais da área	39	61	74	80
• Condição justa: cobertura de grama em 50-75% da área	49	69	79	84
Áreas comerciais e de negócios (85% impermeáveis)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93
Residencial[3]				
Tamanho médio do lote (% impermeáveis[4])				
• 0,05 ha ou menos (65)	77	85	90	92
• 0,10 ha (38)	61	75	83	87
• 0,13 ha (30)	57	72	81	86
• 0,20 ha (25)	54	70	80	85
• 0,40 ha (20)	51	68	79	84
Estacionamento pavimentado, telhados, calçadas etc.[5]	98	98	98	98
Ruas e estradas				
• Pavimentada com meio fio e drenagem[5]	98	98	98	98
• Em cascalho	76	85	89	91
• Sujas	72	82	87	89

Fonte: Manual SWMM 5.0 (2010), p. 169.

O fluxo inicial que entra na bacia hidrográfica PA BD 47, para aproximar os resultados à realidade, foi determinado com base na pesquisa de Reis *et al.* (2013), na qual realizaram medições de vazão em campo em três pontos do Rio Paraibuna. A vazão do ponto 2, situado na área de estudo deste projeto, foi adotada como a vazão de entrada, totalizando 12,77 m³/s. O perfil transversal dos condutos foi definido, para os três condutos, como trapezoidal (Figura 20), também reflexo das medições de Reis *et al.* (2013), no ponto 2 do Rio Paraibuna.

Figura 20 - Seção transversal dos condutos



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM.

A Figura 21, que traz o coeficiente n de Manning para vários tipos de canais abertos, foi utilizada para estabelecer o número de Manning dos condutos. Temos: canais naturais (curso de água pequeno com largura máxima de inundação menor que 100 pés (30 metros)). Utilizou-se o mesmo número de Manning, n = 0,05, para os três condutos.

Figura 21 - Coeficiente de Manning para condutos abertos

Tipo de Canal	Manning n
Canais Revestidos	
• Asfalto	0,013 - 0,017
• Alvenaria	0,012 - 0,018
• Concreto	0,011 - 0,020
• Pedregulho ou enrocamento	0,020 - 0,035
• Vegetal	0,030 - 0,40
Escavado ou dragado	
• Terra, reto e uniforme	0,020 - 0,030
• Terra, sinuoso, razoavelmente uniforme	0,025 - 0,040
• Rocha	0,030 - 0,045
• Sem manutenção	0,050 - 0,140
Canais naturais (curso de água pequeno com largura máxima de inundação < 100 pés)	
• Seção razoavelmente regular	0,030 - 0,070
• Seção irregular com represamento	0,040 - 0,100

Fonte: Manual SWMM 5.0 (2010).

Na Tabela 4, são apresentadas as cotas máxima e mínima, observadas através das curvas de nível, e o maior comprimento de cada bacia. Além disso, são indicadas

a largura característica, um parâmetro desenvolvido para a inserção no SWMM, representando a razão entre a área e o maior comprimento de cada sub-bacia, bem como a inclinação percentual de cada bacia.

Tabela 4-Parâmetros SWMM

Parâmetro	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Sub-bacia 3
Cota Máxima (m)	920,00	945,00	740,00
Cota Mínima (m)	685,00	680,00	680,00
Maior comprimento (m)	1494,42	1690,44	1314,73
Largura característica (m)	668,94	486,26	189,58
Declividade (%)	0,16	0,16	0,05

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base em todos os dados mencionados até o momento, realizou-se a primeira execução do software e a coleta dos dados de vazão do conduto, do nó 1 para o exutório da bacia hidrográfica, sem a utilização dos métodos compensatórios de drenagem. Esses resultados serão detalhados na seção 5 deste trabalho.

Para realização das análises sobre a eficácia dos métodos compensatórios, cada um destes, trincheira de infiltração, pavimento permeável e telhados verdes, foi devidamente inserido no sistema com suas informações e dados correspondentes.

Para definir a eficiência da utilização da trincheira de infiltração no software SWMM foram inseridos os dados de: Superfície – altura da berma: que é a altura da borda da trincheira em relação ao solo ao redor, com 10mm; a rigidez da superfície, pelo número de Manning, n = 0,1; e declividade de 1%. Armazenamento - altura 0,6 m; proporção de vazios de 0,75, taxa de infiltração 0,5 mm/h. Os valores adotados foram baseados nos dados disponíveis no SWMM.

Depois de definidos os dados iniciais da trincheira de infiltração esta foi adicionada para simulações individual e em combinações em cada sub-bacia. Os dados para utilização foram: a área em cada sub-bacia, de acordo com a Tabela 3, e a largura da trincheira de 0,6 m. A porcentagem da área impermeável de cada sub-bacia tratada, quando a trincheira foi inserida, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Porcentagem de influência da trincheira de infiltração em cada sub-bacia.

Local	Área de influência da trincheira individual e com telhado verde (%)	Área de influência da trincheira quando combinada com o pavimento (%)
Sub-bacia 1	56,84	28,42
Sub-bacia 2	64,66	32,33
Sub-bacia 3	67,97	33,99

Fonte: Elaborado pela autora

Os dados utilizados para o pavimento permeável foram: Superfície - altura da superfície, 1 mm, número de Manning n=0,1, inclinação de 1%. Pavimento – grossura 100 mm, volume de vazios 0,5, permeabilidade de 100 mm/h. Armazenamento – grossura de 200 mm, volume de vazios 0,75, taxa de infiltração 0,5 mm/h. Solo – espessura de 25 mm, frações volumétricas para porosidade de 0,5, para capacidade de campo e para capacidade de retenção de água após a chuva de 0,1, condutividade de 0,5 mm/h, inclinação da condutividade de 10% e sucção de 3,5 mm. Os valores adotados foram baseados nos dados disponíveis no SWMM, além disso os dados de permeabilidade do solo foram mantidos de acordo com o software SWMM.

Depois de definidos os dados iniciais do pavimento permeável, este foi adicionado para simulações individual e em combinações em cada sub-bacia. Os dados para utilização foram: a área em cada sub-bacia, de acordo com a Tabela 3, e a largura do pavimento permeável, de 15 m. A porcentagem da área impermeável de cada sub-bacia tratada foi inserida de acordo com a Tabela 6:

Tabela 6 - Porcentagem de influência do pavimento permeável em cada sub-bacia.

Local	Área de influência do pavimento individual e com telhado verde (%)	Área de influência do pavimento quando combinado com a trincheira (%)
Sub-bacia 1	85,86	42,93
Sub-bacia 2	66,89	33,45
Sub-bacia 3	66,54	33,27

Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se, nas tabelas 5 e 6, que a porcentagem reduz quando a trincheira de infiltração e o pavimento permeável são combinados, o que não ocorre quando cada um é combinado com o telhado verde. Isso se deve ao fato de o telhado verde,

ao reter a precipitação, não influencia diretamente a área de influência da trincheira de infiltração ou do pavimento permeável, apenas reduzindo o volume de água que chega até estes. Por outro lado, o pavimento permeável e a trincheira de infiltração, quando atuam juntos, partilham da mesma área de influência, resultando na diminuição da porcentagem.

Os dados para telhados verdes inseridos ao se adicionar telhados verdes como método compensatório foram: Superfície - altura 100 mm, volume de vegetação 80%, a rigidez da superfície, pelo número de Manning, n = 0,1; e declividade de 1%. Solo – grossura 70 mm, frações volumétricas para porosidade de 0,5, para capacidade de campo de 0,2 e para capacidade de retenção de água após a chuva de 0,1, condutividade 0,5 mm/h, inclinação da condutividade de 10%. Material drenante – espessura de 3 mm, fração de vazios de 9,5 e número de Manning 0,1. Os valores adotados foram baseados nos dados disponíveis no SWMM.

Após a definição dos dados iniciais dos telhados verdes, este foi adicionado para simulações individual e em combinações em cada sub-bacia. Os dados para utilização foram a área de ocupação em cada sub-bacia de acordo com a Tabela 3 e a largura da área do telhado em cada unidade, de 12 m.

Os dados para cada um dos métodos foram utilizados com base em critérios padronizados, baseado nas sugestões de cálculo do software SWMM, evitando a necessidade de cálculos individualizados que exigiriam um projeto mais abrangente, com extensa pesquisa e um tempo significativamente maior para execução.

Depois de definidos todos os dados dos métodos compensatórios de drenagem executou-se o software para os seguintes cenários da bacia:

I. sem métodos compensatórios de drenagem;
II. com pavimento permeável;
III. telhado verde;
IV. trincheira de infiltração;
V. a combinação de todos os métodos analisados;

VI. e combinações de dois métodos compensatórios, como: pavimento permeável com trincheira de infiltração, telhado verde com pavimento permeável, e telhado verde com trincheira de infiltração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise dos resultados foi considerado o conduto final da bacia, do Nó 1 para o exutório,o Rio Paraibuna, onde se somam as vazões de toda a bacia hidrográfica, os dados foram derivados da modelagem no software SWMM.

Os resultados de cada etapa são mostrados nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e na vazão máxima nos métodos individuais.

Vazões	Sem métodos compensatórios	Pavimento permeável	Telhado verde	Trincheira de infiltração
	Vazão do Nó1 para o Exutório (CMS)			
Vazão média	9,82	9,62	9,76	9,81
Vazão máxima	14,31	10,95	14,18	13,81
% de redução na média	-	2,02	0,58	0,13
% de redução na máxima	-	23,48	0,91	3,49

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 8 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e na vazão máxima nos métodos combinados.

Vazões	Sem métodos compensatórios	Pavimento e trincheira	Telhado e pavimento	Telhado e trincheira
	Vazão do Nó1 para o Exutório (CMS)			
Vazão média	9,82	9,66	9,56	9,76
Vazão máxima	14,31	12,19	10,80	13,81
% de redução na média	-	1,63	2,70	0,61
% de redução na máxima	-	14,81	24,53	3,49

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 9 - Vazões e porcentagem de redução na vazão média e na vazão máxima de todos os métodos combinados.

Vazões	Sem métodos compensatórios	Pavimento, telhado e trincheira
	Vazão do Nó1 para o Exutório (CMS)	
Vazão média	9,82	9,61
Vazão máxima	14,31	12,08
% de redução na média	-	2,17
% de redução na máxima	-	15,58

Fonte: Elaborado pela autora

A bacia hidrográfica em sua situação atual, sem os métodos compensatórios de drenagem, para a precipitação considerada, do dia 10 de janeiro de 2022, retorna os valor de vazão média de 9,82 m³/s e valor de vazão máxima de 14,31 m³/s. Esses resultados estão em consonância com valores encontrados por Dutra *et al.* (2022), trabalho no qual são medidas as vazões em oito pontos do rio Paraibuna, sendo o ponto cinco mais próximo do conduto analisado (nó 1 para exutório). No trabalho de Dutra *et al.* (2022), a vazão na época de seca é de 5,8 m³/s e na época de cheia 63,69 m³/s. Sendo assim, as vazões máxima e média encontradas se encontram neste intervalo.

Na implementação dos métodos compensatórios de drenagem individualmente, o valor mais significativo de redução na média foi o pavimento permeável, que retornou uma redução de 2,02%. Esse percentual representa um valor 1,44 superior ao telhado verde e 1,89 a mais que a trincheira de infiltração. Na redução máxima, o valor mais significativo também foi na implementação do pavimento permeável, que retornou uma redução de 23,48%, valor 22,57 superior ao telhado verde e 19,99 a mais que a trincheira de infiltração. No entanto deve-se ressaltar que este método foi utilizado em maior área da bacia, se comparado aos demais métodos implementados.

Nos resultados da implementação das combinações dos métodos compensatórios, o valor mais relevante na redução média foi a associação do telhado verde com o pavimento permeável, que retornou uma valor de 2,70%, 1,07 a mais que a associação do pavimento permeável com a trincheira de infiltração e 2,09 a mais que a associação do telhado verde com a trincheira de infiltração. Na redução máxima

também foi a associação do telhado verde com o pavimento permeável que retornou uma redução de 24,53%, 9,72 a mais que a associação do pavimento permeável com a trincheira de infiltração e 21,04 a mais que a associação do telhado verde com a trincheira de infiltração.

Na implementação de todos os métodos escolhidos para utilização neste trabalho - pavimento permeável, telhado verde e trincheira de infiltração - o valor da vazão média é de 9,82 m³/s sem os métodos compensatórios e 9,61 m³/s com os métodos, uma redução de 2,17%. O valor da vazão máxima é de 14,31 m³/s sem os métodos e 12,08 m³/s com os métodos, uma redução de 15,58%. Teoricamente é esperado que os valores da implementação de todos os métodos retornem valores superiores às combinações de duas técnicas, contudo foram encontrados valores inferiores devido à limitações no software SWMM.

Tendo em vista todos os resultados obtidos, podemos observar que as porcentagens de redução na vazão média não foram expressivas, não ultrapassando o valor de 2,70%. No entanto, considerando que durante a vazão máxima, no horário de 18:15h do dia 10 de janeiro de 2022, é o momento de maior risco de transbordamento do rio, a redução pode chegar a 24,53%, um valor expressivo, que pode mitigar consideravelmente a vazão.

O trabalho de avaliação da mitigação na vazão advindo da utilização de telhados verdes de Nunes *et al*, (2017), ao aplicar o telhado verde na área total impermeabilizada das sub-bacias da Bacia do Rio Morto, Rio de Janeiro, tem resultado numa redução percentual de 4,1 a 11,1 na vazão de pico, o que está condizente com os resultados obtidos neste trabalho, que ao se considerar a aplicação do telhado verde em 22,66% da área impermeável da bacia se obteve resultado de redução na vazão média de 0,58% e na vazão de pico 0,91%, o que é proporcionalmente superior aos resultados de Nunes *et al* (2017).

Welzel (2021), por sua vez, ao avaliar a redução do escoamento superficial numa área do campus Ecoville da UTFPR, em Curitiba, utilizando a combinação de trincheira de infiltração e pavimento permeável em toda área de estudo atingiu um resultado de redução entre 17% e 20%. Ao se utilizar a mesma combinação neste trabalho, com área de influência máxima dos métodos de 71,35%, se obteve uma redução de 14,81%.

Em alguns casos, telhados verdes podem cobrir grandes áreas de edifícios ou até mesmo ocupar toda a superfície disponível, desde que sejam considerados cuidadosamente aspectos como a engenharia estrutural do prédio, a drenagem adequada da água e os requisitos de manutenção. Em outros casos, a limitação pode ser imposta por questões técnicas ou estruturais específicas de cada edificação. É importante considerar todos esses fatores ao planejar um telhado verde de grandes dimensões. Considerando esse fato, a implementação dos telhados verdes em Juiz de Fora encontra uma grande limitação, pelo fato de a cidade ter sido desenvolvida sem considerar a carga adicional que a estrutura precisa suportar. Seria necessário, então, a realização de estudos de caso em todas as unidades, para definir a possibilidade do uso deste método compensatório.

A implementação das trincheiras oferece vantagens, como a possibilidade de fechar apenas um lado da rua durante a execução da obra, reduzindo impactos no trânsito e na mobilidade urbana. No entanto, na elaboração do projeto, é crucial considerar nos cálculos a proximidade que podem ter com as edificações ao redor. É necessário também que a execução seja feita com cautela para evitar danos estruturais, infiltrações ou vazamentos indesejados.

A implementação de pavimentos permeáveis pode apresentar desafios significativos, como a mudança no tráfego durante a execução da obra e o alto investimento inicial. As intervenções necessárias para instalar esse tipo de pavimento podem resultar em interrupções no trânsito, desvio de trajeto ou ainda redução na velocidade, o que pode causar inconvenientes para os motoristas e moradores da região. Apesar destes desafios, o uso de pavimento permeáveis oferece benefícios como o grande impacto na mitigação da vazão final na bacia hidrográfica

6. CONCLUSÃO

Esse trabalho tinha como objetivo modelar o escoamento superficial de uma Bacia Hidrográfica altamente urbanizada, localizada na cidade de Juiz de Fora, de forma a avaliar a efetividade do uso de técnicas compensatórias de drenagem. Por meio da avaliação dos resultados obtidos, pela modelagem no software SWMM, na

redução da vazão através da implementação dos métodos trincheira de infiltração, pavimento permeável e telhado verde, foi possível concluir que a utilização destes métodos compensatórios de drenagem urbana podem trazer grandes benefícios durante precipitações intensas.

Observando e analisando o resultado de redução na vazão nos diversos cenários propostos de utilização dos métodos, comparado à situação da bacia hidrográfica sem estes, destaca-se que a eficiência mais significativa foi observada na combinação entre pavimento permeável e telhado verde. Essa conjunção demonstrou uma redução mais notável na vazão, destacando-se como a proposta mais eficaz entre as consideradas.

Os pavimentos permeáveis combinados com telhados verdes devem ser integrados nos sistemas de drenagem urbanos, tanto em novos projetos residenciais como em áreas já desenvolvidas, visando aprimorar a eficiência dos sistemas preexistentes. A disseminação da compreensão sobre o funcionamento e os benefícios desses métodos deve ser promovida, visando uma melhor aceitação da utilização de métodos compensatórios de drenagem.

Uma proposta de projeto para implementação de métodos compensatórios de drenagem deve considerar uma ampla gama de aspectos que garantam a aceitação, ante a população, e a eficácia na infraestrutura. Dessa forma, a seguir são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros com abordagem de diferentes aspectos relacionados a esses métodos:

- Comparar economicamente a implementação destes métodos, considerando custos iniciais, gastos em manutenção ao longo do tempo, benefícios econômicos a longo prazo, como custos de tratamento de água e potencial na valorização dos imóveis.
- Investigar a confiabilidade estrutural para execução de telhados verdes, realizando testes para avaliar a capacidade de suporte das estruturas, levando em conta os materiais utilizados, o projeto inicial e eficácia em diferentes circunstâncias (como, por exemplo, mudanças climáticas).
- Examinar a viabilidade da implementação de trincheira de infiltração considerando, além da eficácia hidrológica, os impactos nas estruturas

próximas. Avaliando riscos relacionados à erosão do solo e infiltração nas fundações das estruturas.

- Avaliar o impacto no tráfego durante a implementação dos pavimentos permeáveis e propor estratégias que minimizem os transtornos causados pela interrupção no fluxo de veículos.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M., NASCIMENTO, N., BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**, Porto Alegre: ABRH, 2005. 266 p.

CANHOLI, ALUÍSIO PARDO. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. – São Paulo; Oficina de Textos, 2014.

DUTRA, WANDER P. D; FIA, RONALDO; RIBEIRO, CELSO B. M. **Water quality modeling in the Paraibuna River in Juiz de Fora/MG: diagnosis and prognosis.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais. RBCIAMB v.57, n.2, June, 2022 p. 256-267. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1288/775. Acesso em: 24, nov. 2023

Estado de Minas. **Após prometer 19 piscinões contra enchentes, SP prevê entregar só 13**, Estao de Minas, São Paulo, 10 Jan. 2020. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/nacional/2020/01/10/interna_nacional,1113496/apos-prometer-19-piscinoes-contra-enchentes-sp-preve-entregar-so-13.shtml. Acesso em: dez. 2023

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama. Acesso em: dez. 2023.

KADAM, D. (Ed.). **Manual do Usuário do Storm Water Management Model**, Versão 5.2. Lausanne: Laboratório de Mecânica Ambiental e Hidrologia (LCH), 2018. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf. Acesso em: nov. 2023

LIMA, L.; CARMO, L.; SOUZA, A.; BARROS, L.; FELIPPE, M. Mapeamento de planícies fluviais: contribuição metodológica a partir do caso do rio Paraibuna em Juiz de Fora, MG. IX SINAGEO. **Anais...** Rio de Janeiro, 2012. Dipsponível em: https://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/8/8-227-454.html. Acesso em nov. 2023.

MENDES, ALESI TEIXEIRA e SANTOS, GESMAR ROSA. **Drenagem e manejo sustentavel de aguas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?**. Rio de

Janeiro. IPEA. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11420/1/TD_2791.pdf. Acesso: 14 de nov. 2023.

MIGUEZ, MARCELO GOMES. VERÓL, ALINE PIRES. REZENDE, OSWALDO MOURA. **Drenagem urbana do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro GEN LTC 2015

NUNES, DAYANE M; FONSECA, PAULO L D; SILVA, LUCIENE P. **Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na Cidade do Rio de Janeiro**. Labor & Engenho, Campinas [SP] Brasil, v.11, n.3, p.374-393, jul./set. 2017. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/labore/article/view/8648820/16692%20FAzer%20referencia%20desse%20endere%C3%A7o%20para%20tcc Acesso em: 29, nov. 2023.

Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora e Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP). (2012). Plano de Drenagem da Zona Norte de Juiz de Fora: **Diagnóstico da situação atual da drenagem na Zona Norte**. Juiz de Fora, MG: Prefeitura Municipal de Juiz de Fora. Disponível em: https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planos_programas/arquivos/diagnostico.pdf.

PRINCE GEORGE'S COUNTY. Department of Environmental Resources. **Low-impact development design strategies: an integrated design approach**. Low Impact Development Center, Maryland, 1999.

REIS, TAIANA E.; BOAS, LUCAS G. V; OLIVEIRA, MATEUS C. P; FELIPPE, MIGUEL F. Caracterização hidrogeomorfológica do rio paraibuna no trecho de Juiz de Fora/MG. Revista Geografia. v.2, n.2, p.1-8, 2013. Disponível em: https://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/17918/9225. Acesso em: 24, nov. 2023.

TUCCI, C. E. M. e BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre. 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Juan-

Bertoni/publication/266883894_INUNDACOES_URBANAS_NA_AMERICA_DO_SUL/links/56b352cd08ae3d06a26644e2/INUNDACOES-URBANAS-NA-AMERICA-DO-SUL.pdf. Acesso em 13 nov. 2023

TUCCI, CARLOS E. M; SILVEIRA, L. L. ANDRÉ., (2004). **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 3.ed., primeira reimpressão. – Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 943 p.

TUCCI, CARLOS E.M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**, Ministério das Cidades, Global Water Partnership, Wolrd Bank, Unesco 2005.

TUCCI, CARLOS E.M. (2008) **Águas urbanas**. Revista Estudos avançados 63. USP 97-112. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/eav/issue/view/751. Acesso em: 14 nov. 2023.

URBONAS, B.; STAHRE, P., 1993. **Stormwater Best Management Practices and Detetion,** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.

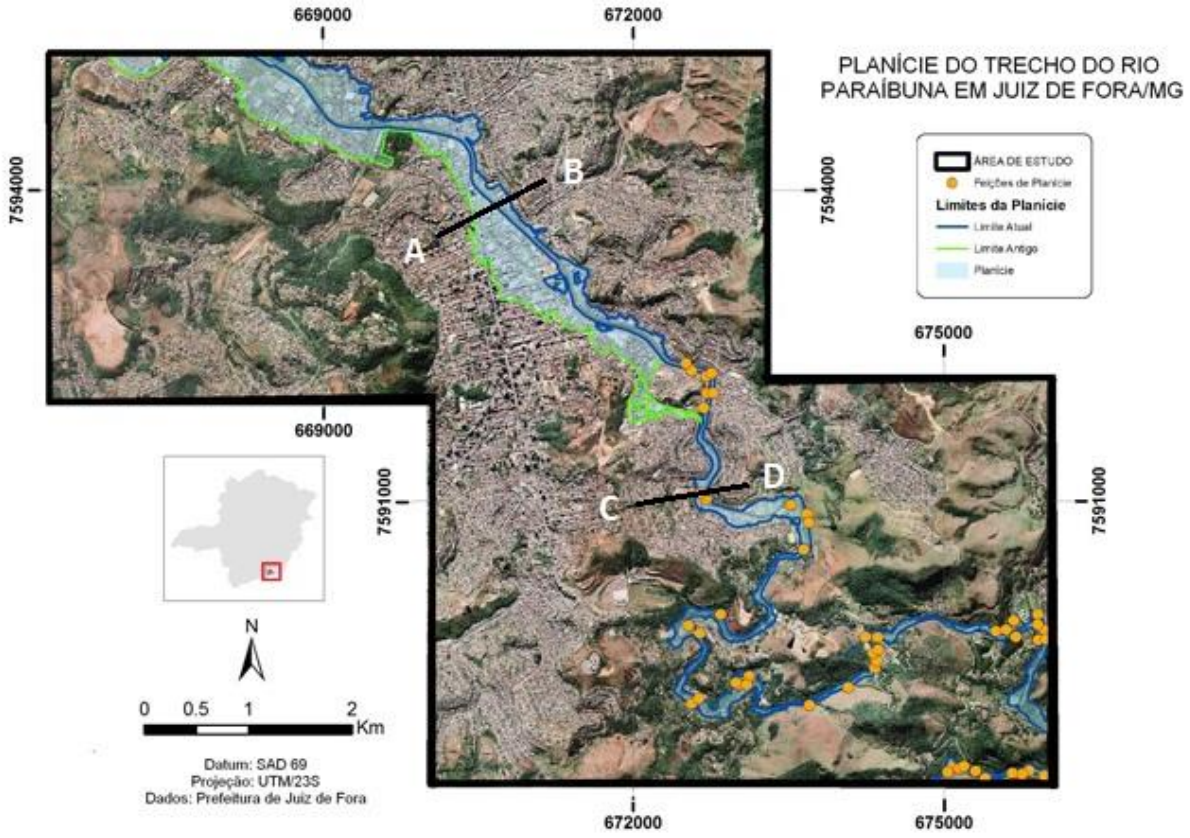
WELZEL, CAROLINA CASSIANO. **Uso do software SWMM para avalização da influência de dispositivos LID nas vazões de águas pluviais geradas no estacionamento da UTFPR Ecoville**. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Paraná, 2021

WOODS BALLARD, B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; ILLMAN, S.; SCOTT, T.; Ashley, R.; Kellagher, R. **The SuDS Manual**, C753, CIRIA, London, UK, 2015. Disponível em: http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf. Acesso em: 13 nov .2023

ANEXO 1

Mapa da planície de inundação do rio Paraibuna, no município de Juiz de Fora

Figura 23 – Planície de inundação do rio Paraibuna



Fonte: Lima *et al.* (2012)