



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FLÁVIA GUEDES DE OLIVEIRA

**CIDADES RESILIENTES: O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÕES
BASEADAS NA NATUREZA PARA ATENUAÇÃO DE CHEIAS DO RIBEIRÃO
YUNG (JF)**

**JUIZ DE FORA
2026**

FLÁVIA GUEDES DE OLIVEIRA

CIDADES RESILIENTES: O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS
NA NATUREZA PARA ATENUAÇÃO DE CHEIAS DO RIBEIRÃO YUNG (JF)

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

Orientador: Prof. Celso Bandeira
de Melo Ribeiro

JUIZ DE FORA

2026

FLÁVIA GUEDES DE OLIVEIRA

CIDADES RESILIENTES: O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA
NATUREZA PARA ATENUAÇÃO DE CHEIAS DO RIBEIRÃO YUNG (JF)

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: 07/07/2026.

COMISSÃO EXAMINADORA:

 Documento assinado digitalmente
CELSO BANDEIRA DE MELO RIBEIRO
Data: 20/07/2026 09:26:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

 Documento assinado digitalmente
LEONARDO LEON LEITE MOREIRA
Data: 20/07/2026 10:53:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

 Documento assinado digitalmente
EDUARDA TRINDADE FILGUEIRAS
Data: 20/07/2026 14:29:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, a Deus. Este sonho veio Dele e cada passo desta jornada foi guiado por Ele. Nos momentos em que a caminhada parecia pesada demais, foi n'Ele que encontrei força, direção e a certeza de que o que é Dele chega no tempo certo. Que esta conquista seja, antes de qualquer coisa, uma oferta de gratidão a Quem tornou tudo possível.

Aos meus pais, Célia e Reinaldo, que fizeram de tudo e muitas vezes mais do que podiam, para que eu chegasse até aqui. Vocês são a base de tudo que sou. Nenhuma palavra é suficiente para expressar o tamanho da minha gratidão e do meu amor por vocês.

Às minhas irmãs, Daphine e Priscila, que estiveram ao meu lado em cada fase dessa trajetória. Obrigada por serem presença constante, pelo apoio silencioso nos dias difíceis e pela alegria compartilhada nas vitórias. Ter vocês é um privilégio que carrego com muito carinho.

Aos meus amigos Ana Paula, Márcio e Maycon, que acompanharam de perto cada etapa deste trabalho. Vocês tornaram esse processo menos solitário e a faculdade muito mais leve. Obrigada por cada palavra de incentivo, por cada momento de descontração e por estarem presentes quando eu mais precisei.

Ao professor Celso, orientador deste trabalho, pela disponibilidade, paciência e pelas orientações que foram fundamentais para que este trabalho tomasse forma.

Às pessoas incríveis que conheci ao longo dessa trajetória, e que me fizeram enxergar a beleza da engenharia na prática, mostrando-me como ela pode ser uma ferramenta de transformação real na vida das pessoas.

"É justo que muito custe o que muito vale."

Santa Teresa de Ávila

RESUMO

O crescimento acelerado das áreas urbanas e a consequente impermeabilização do solo têm intensificado a ocorrência de alagamentos e inundações nas cidades brasileiras, evidenciando a necessidade de soluções de drenagem mais sustentáveis. Nesse contexto, o presente trabalho trata-se de um estudo sobre os efeitos da aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) na bacia hidrográfica do Ribeirão Yung, localizada no município de Juiz de Fora, Minas Gerais. Os dados da bacia foram obtidos por meio do *software* QGIS, enquanto que a modelagem hidrológica foi desenvolvida no *software* SWMM (*Storm Water Management Model*), da EPA. Para a simulação, foi escolhido um período de oito dias de análise dentro do qual foram utilizados dados de precipitação da estação pluviométrica Linhares (CEMADEN), referentes a um evento de chuva intensa ocorrido em fevereiro de 2026, com precipitação acumulada de 296,48 mm e intensidade máxima de 23,15 mm em 10 minutos. Já as técnicas compensatórias selecionadas foram biovaletas, jardins de chuva e bacias de retenção, implantadas com base em critérios topográficos e de uso e ocupação do solo identificados na bacia. Os resultados foram analisados a partir da comparação entre oito cenários: um correspondente à condição atual da bacia, sem implantação de SbN; um com a aplicação simultânea das três técnicas (biovaletas, jardins de chuva e bacias de retenção); e seis cenários com diferentes combinações entre os dispositivos. A análise indicou que as bacias de retenção apresentaram maior eficiência, promovendo redução de aproximadamente 33% na vazão máxima do exutório em todos os cenários em que foram inseridas, enquanto jardins de chuva e biovaletas apresentaram efeitos pouco expressivos inferiores a 0,10% quando analisados isoladamente. Entre os cenários avaliados, a combinação entre bacias de retenção e jardins de chuva apresentou o melhor desempenho, com redução de 33,02% na vazão máxima e de 3,31% no volume total escoado. Conclui-se então que as Soluções Baseadas na Natureza, especialmente as bacias de retenção, podem contribuir significativamente para a melhoria do sistema de macrodrenagem urbana da bacia do Ribeirão Yung, representando uma alternativa viável para a mitigação dos impactos associados a eventos intensos de precipitação em bacias hidrográficas mistas.

Palavras-chave: Drenagem urbana; Soluções Baseadas na Natureza; Bacia hidrográfica; QGIS; SWMM.

ABSTRACT

The rapid growth of urban areas and the resulting soil impermeabilization have intensified the occurrence of flooding and inundation in Brazilian cities, highlighting the need for more sustainable drainage solutions. In this context, the present study investigates the effects of applying Nature-Based Solutions (NbS) in the Ribeirão Yung watershed, located in the municipality of Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil. Watershed data were obtained using QGIS *software*, while hydrological modeling was performed using the EPA's SWMM (*Storm Water Management Model*). For the simulation, an eight-day analysis period was selected, using precipitation data from the Linhares rainfall station (CEMADEN), corresponding to an intense rainfall event that occurred in February 2026, with a total accumulated precipitation of 296.48 mm and a peak intensity of 23.15 mm within 10 minutes. The selected compensatory techniques included bioswales, rain gardens, and detention basins, implemented according to topographic and land use and land cover criteria identified within the watershed. Results were analyzed through the comparison of eight scenarios: one representing the current watershed condition without NbS implementation; one considering the simultaneous application of the three techniques (bioswales, rain gardens, and detention basins); and six additional scenarios combining the selected devices in different ways. The analysis indicated that detention basins showed the highest efficiency, promoting an approximate 33% reduction in the maximum outflow discharge in all scenarios where they were implemented, whereas rain gardens and bioswales showed limited effects below 0.10% when evaluated individually. Among the evaluated scenarios, the combination of detention basins and rain gardens achieved the best performance, with reductions of 33.02% in maximum discharge and 3.31% in total runoff volume. It is concluded that Nature-Based Solutions, especially detention basins, can significantly contribute to improving the urban macrodrainage system of the Ribeirão Yung watershed, representing a feasible alternative for mitigating impacts associated with intense rainfall events in mixed watersheds.

Keywords: Urban drainage; Nature-Based Solutions; Watershed; QGIS; SWMM.

FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica para um jardim de chuva.....	24
Figura 2 - Demonstração de uma biovaleta.....	25
Figura 3 - Bacia de detenção.....	26
Figura 4 - Camadas que compõem o telhado verde.....	27
Figura 5 - Tipo de pavimento permeável.....	28
Figura 6 - Limite da bacia do Ribeirão Yung, em vermelho.....	29
Figura 7 - Cursos d'água e divisão das sub-bacias da bacia do Ribeirão Yung.....	32
Figura 8 - Uso e ocupação do solo para a bacia do Ribeirão Yung.....	33
Figura 9 - Precipitação x hora do dia 20 a 27 de fevereiro de 2026, estação 313670233A..	35
Figura 10 - Latossolos - Grupo B.....	36
Figura 11 - Cambissolos - Grupo C.....	37
Figura 12 - Coeficiente n de Manning - escoamento à Superfície Livre.....	38
Figura 13 - Relação entre o uso da terra e a classe hidrológica do solo para definição da Curva Número.....	40
Figura 14 - Definição de nós, condutos e exutório.....	41
Figura 15 - Seção transversal dos condutos.....	42
Figura 16 - Coeficiente de Manning para condutos abertos.....	43
Figura 17 - Características do solo.....	52
Figura 18 - Hidrograma sem o uso de SBNs.....	55
Figura 19 - Hidrograma com o uso só de bacias de detenção.....	57
Figura 20 - Hidrograma com o uso só de jardins de chuva.....	58
Figura 21 - Hidrograma com o uso só de biovaletas.....	59
Figura 22 - Hidrograma com o uso de bacias de detenção e jardins de chuva.....	60
Figura 23 - Hidrograma com o uso de bacias de detenção e biovaletas.....	61
Figura 24 - Hidrograma com o uso de jardins de chuva e biovaletas.....	62
Figura 25 - Hidrograma com o uso das três técnicas compensatórias.....	63

TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das sub-bacias da bacia do Ribeirão Yung.....	32
Tabela 2 - Uso e ocupação do solo nas sub-bacias (ha).....	34
Tabela 3 - Área de uso e ocupação do solo separados por classe.....	34
Tabela 4 - Coeficientes de Manning médios ponderados por sub-bacia.....	39
Tabela 5 - Curva Número.....	41
Tabela 6 - Parâmetros dos nós de junção.....	42
Tabela 7 - Parâmetros dos condutos.....	43
Tabela 8 - Coordenadas das técnicas compensatórias e dados por sub-bacia.....	45
Tabela 9 - Áreas totais de implantação por solução e sub-bacia.....	50
Tabela 10 - Porcentagem da área impermeável tratada por sub-bacia.....	50
Tabela 11 - Parâmetros das LIDs inseridos no SWMM.....	51
Tabela 12 - Cenários de simulação.....	52
Tabela 13 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 1.....	53
Tabela 14 - Vazão máxima e volume total.....	55
Tabela 15 - Resultados comparativos dos cenários de simulação no exutório.....	56
Tabela 16 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 2.....	57
Tabela 17 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 3.....	58
Tabela 18 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 4.....	59
Tabela 19 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 5.....	60
Tabela 20 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 6.....	61
Tabela 21 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 7.....	62
Tabela 22 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 8.....	63
Tabela 23 - Resumo das reduções por cenário.....	65
Tabela 24 - Comparação entre capacidade de armazenamento das bacias de retenção e volume escoado por sub-bacia.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Justificativa.....	16
1.2. Organização do texto.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. Objetivo geral.....	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1. Drenagem urbana.....	20
3.2. Soluções baseadas na natureza.....	21
3.3. Técnicas compensatórias.....	22
3.3.1. Jardins de chuva.....	23
3.3.2. Biovaletas.....	24
3.3.3. Bacia de retenção.....	25
3.3.4. Telhados verdes.....	26
3.3.5. Pavimentos permeáveis.....	27
3.4. Modelagem hidrológica.....	28
4. METODOLOGIA.....	29
4.1. Área de estudo.....	29
4.2. Softwares utilizados.....	29
4.2.1. QGIS.....	30
4.2.2. SWMM 5.2.....	30
4.3. Modelagem no QGIS.....	31
4.3.1. Obtenção dos dados de entrada.....	31
4.3.2. Delimitação da bacia e sub-bacias.....	31
4.3.3. Parâmetros morfométricos.....	32
4.3.4. Uso e ocupação do solo.....	33
4.4. Dados de precipitação.....	34
4.5. Caracterização pedológica e grupos hidrológicos.....	35
4.6. Modelagem no SWMM.....	37
4.6.1. Configuração geral da simulação.....	37
4.6.2. Pluviômetro e dados de precipitação.....	37
4.6.3. Parâmetros das sub-bacias.....	38
4.6.4. Curva número (CN).....	39
4.6.5. Nós, condutos e exutório.....	41
4.7. Soluções baseadas na natureza.....	43
4.7.1. Critérios para dimensionamento.....	44
4.7.2. Áreas de implantação por sub-bacia.....	45
4.7.3. Parâmetros das SbN no SWMM.....	50
4.7.4. Cenários de simulação.....	52

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1. Caracterização da precipitação do evento crítico.....	53
5.2. Análise sem soluções baseadas na natureza.....	53
5.2.1. Escoamento por sub-bacia.....	53
5.2.2. Vazões no exutório.....	54
5.3. Resultados por cenário de simulação.....	55
5.4. Análise de cada cenário.....	56
5.4.1. Bacias de retenção - Cenário 2.....	56
5.4.2. Jardins de chuva - Cenário 3.....	57
5.4.3. Biovaletas - Cenário 4.....	58
5.4.4. Bacias de retenção + Jardins de chuva - Cenário 5.....	59
5.4.5. Bacias de retenção + Biovaletas - Cenário 6.....	60
5.4.6. Jardins de chuva + Biovaletas - Cenário 7.....	61
5.4.7. Todas as soluções combinadas - Cenário 8.....	62
5.5. Comparação geral.....	63
5.6. Limitações do estudo.....	65
6. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

O acelerado processo de urbanização verificado na segunda metade do século XX transformou o Brasil em um país majoritariamente urbano, com aproximadamente 83% da sua população concentrada nas cidades (TUCCI, 2008). Ademais, o avanço da urbanização e a consequente impermeabilização do solo contribuem para o aumento do volume de escoamento das águas pluviais e para a redução da capacidade natural de amortecimento, elevando, dessa forma, as vazões máximas, que podem chegar a até seis vezes os valores observados antes da urbanização (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007).

Além disso, segundo o Atlas de Mortalidade e Perdas Econômicas da Organização Meteorológica Mundial (WMO), os desastres naturais associados ao excesso ou à falta de precipitação estão entre os que mais causam impactos em termos de perdas humanas no mundo, sendo responsáveis por aproximadamente 1,3 milhão de mortes entre 1970 e 2019. Outro ponto é que ao longo desse período, registrou-se, em média, pelo menos um desastre relacionado ao clima ou aos recursos hídricos por dia em escala global (MENDES; SANTOS, 2022).

Impera ainda que é comum entre projetistas e gestores a ideia de que a melhor solução consiste em afastar a água da chuva o mais rápido possível, ampliando a capacidade de condução do sistema de drenagem. Entretanto, essa estratégia tende apenas a deslocar os problemas de alagamento para outras áreas, o que pode demandar, no futuro, intervenções mais complexas e de maior custo (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007). Essa ideia, conhecida como fase higienista, resultou na degradação dos rios, na contaminação das fontes hídricas e na permanência dos problemas relacionados às inundações (TUCCI, 2008). Segundo o autor, o Brasil ainda apresenta características dessa fase, devido à insuficiência no tratamento de esgoto, à transferência dos problemas de inundação ao longo do sistema de drenagem e à deficiência no gerenciamento de resíduos sólidos (TUCCI, 2008). Diante desse cenário, o debate atual tem reforçado a necessidade de mudanças voltadas a medidas preventivas, sustentáveis e integradas às demais políticas urbanas (MENDES; SANTOS, 2022).

Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - Águas Pluviais (SNIS-AP) demonstram a dimensão dos desafios enfrentados pelo

Brasil na área de drenagem urbana. Uma vez que, entre os municípios analisados, 1.468 (40,2% da amostra) declararam não possuir equipe técnica destinada aos serviços de drenagem urbana, enquanto 2.938 municípios (80,4%) informaram não dispor de plano diretor específico para drenagem urbana e manejo das águas pluviais (MENDES; SANTOS, 2022). Além disso, apenas 23,4% dos municípios relataram adotar algum tipo de solução sustentável de drenagem, dentre eles, somente 280 declararam possuir parques lineares e 174 registraram dispositivos de retenção e/ou detenção (MENDES; SANTOS, 2022).

A revisão do Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), realizada em 2019, também evidenciou a desigualdade na distribuição dos investimentos em saneamento, mostrando que a maior parcela dos recursos foi destinada ao abastecimento de água potável (40,3%) e ao esgotamento sanitário (42,8%), enquanto drenagem, manejo de águas pluviais e resíduos sólidos, juntos, representaram menos de 20% do total investido entre 2003 e 2017 (MENDES; SANTOS, 2022). Nesse contexto, nota-se que um dos principais desafios enfrentados consiste em superar a permanência do modelo convencional, de caráter higienista, ainda predominante no manejo das águas pluviais no país (MENDES; SANTOS, 2022).

Em resposta a esses desafios, a partir da década de 1980 passaram a ganhar espaço diferentes abordagens voltadas à drenagem urbana sustentável, que receberam distintas denominações ao redor do mundo, como *Best Management Practices* (BMP), *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e *Green Infrastructure* (GI) (GUTIERREZ; RAMOS, 2017). De modo geral, essas estratégias envolvem elementos integrados à infraestrutura hidráulica urbana, frequentemente associados ao uso de vegetação, para atuar na retenção, infiltração, filtração, condução e armazenamento das águas pluviais. Além de auxiliar no manejo do escoamento superficial, esses sistemas buscam minimizar degradações e favorecem a remoção natural de parte dos poluentes adquiridos durante o escoamento urbano (GUTIERREZ; RAMOS, 2017).

Diferentemente dos sistemas convencionais de drenagem, as técnicas de controle na fonte têm como princípio reter e infiltrar a água da chuva ainda próxima ao local onde ela é gerada, contribuindo para um funcionamento mais sustentável do sistema de drenagem. Dessa forma, favorecem o rearranjo temporal e espacial das

vazões, reduzem o volume escoado e ajudam a diminuir a probabilidade de inundações em áreas a jusante (TOMINAGA, 2013 *apud* GUTIERREZ; RAMOS, 2017).

Com isso, a abordagem LID propõe uma visão integrada do manejo das águas pluviais, buscando recuperar características naturais do ciclo hidrológico e, ao mesmo tempo, agregar benefícios ao ambiente urbano (GUTIERREZ; RAMOS, 2017). Nesse contexto, destaca-se como uma estratégia capaz de aproximar a drenagem urbana dos princípios do desenvolvimento sustentável, já que sua implementação pode ocorrer de forma compatível com os sistemas existentes e contribuir para melhorias, principalmente em processos de reformulação de empreendimentos (KLOSS; CALARUSSE, 2006 *apud* CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007).

Entre as técnicas de controle na fonte pode se destacar os jardins de chuva, os microrreservatórios e as valas de infiltração. Os jardins de chuva, também conhecidos como sistemas de biorretenção, consistem em pequenas depressões rasas no terreno destinadas a receber o escoamento superficial, promovendo o armazenamento temporário da água e sua infiltração gradual no solo. Além disso, auxiliam na remoção de poluentes por meio da atividade biológica de plantas e microrganismos (GUTIERREZ; RAMOS, 2017). Os microrreservatórios, por sua vez, são utilizados para compensar a redução da capacidade natural de armazenamento em áreas altamente impermeabilizadas, promovendo a retenção temporária das águas pluviais e contribuindo para o amortecimento dos picos de cheia (GUTIERREZ; RAMOS, 2017). Já as valas de infiltração funcionam como dispositivos de drenagem lateral que concentram o fluxo proveniente das áreas adjacentes e favorecem a infiltração ao longo de sua extensão, auxiliando também na filtração e remoção de poluentes (GUTIERREZ; RAMOS, 2017).

Nesse contexto, insere-se o município de Juiz de Fora, localizado na Zona da Mata de Minas Gerais. O município possui área territorial de 1.435,749 km² e apresentou população recenseada de 540.756 habitantes em 2022, com estimativa de 567.730 habitantes para 2025, resultando em densidade demográfica de 376,64 hab/km² (IBGE, 2025). Diante dessas características, Juiz de Fora pode ser compreendida como uma cidade inserida no processo de urbanização intensificada observado em centros urbanos regionais brasileiros, reproduzindo

problemas relacionados ao crescimento urbano desordenado e aos impactos ambientais já identificados em grandes regiões metropolitanas (TUCCI, 2008).

Entretanto, assim como ocorre em grande parte dos municípios brasileiros, a drenagem urbana ainda tende a receber pouca prioridade na gestão pública, em razão da ausência de planejamento específico para o setor, frequentemente desvinculado de áreas correlatas, como abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007). A mudança desse cenário demanda ações articuladas em nível estadual e federal, capazes de oferecer suporte técnico aos municípios e incentivar alternativas de controle voltadas à solução mais efetiva dos problemas, considerando toda a área de influência e buscando reduzir custos e impactos ambientais (TUCCI, 2008; CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007). Sob essa ótica, a modelagem hidrológico-hidráulica se apresenta como uma ferramenta importante para identificar pontos críticos de alagamento nos sistemas de drenagem, além de permitir a construção e avaliação de diferentes cenários de intervenção e medidas de controle do escoamento (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007).

Além disso, a relevância deste trabalho está associada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente ao ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, e ao ODS 13 - Combate às Alterações Climáticas, que incentivam a formulação de políticas e estratégias voltadas ao uso eficiente dos recursos, à adaptação às mudanças climáticas e à incorporação de medidas climáticas no planejamento e na gestão territorial (GUTIERREZ; RAMOS, 2017). Da mesma forma, a ODS 6 - Água Potável e Saneamento e a ODS 11 reforçam a necessidade de transição para modelos de desenvolvimento urbano mais sustentável, integrando políticas relacionadas à habitação, ao saneamento básico, ao meio ambiente e aos recursos hídricos. Essa integração torna-se especialmente relevante diante do aumento da frequência de inundações, dos impactos sobre a população e dos elevados custos associados às medidas corretivas (MENDES; SANTOS, 2022).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo analisar o sistema de macrodrenagem urbana da bacia do Ribeirão Yung, localizada em Juiz de Fora (MG), por meio de modelagem hidrológico-hidráulica desenvolvida no *software* SWMM (*Storm Water Management Model*). Para isso, busca-se avaliar o comportamento do sistema em cenários com e sem a aplicação de Soluções

Baseadas na Natureza (SbN), especificamente biovaletas, jardins de chuva e bacias de retenção, utilizando dados coletados e processados no *software* QGIS. Dessa forma, pretende-se verificar a eficiência dessas técnicas compensatórias na redução dos picos de vazão e sua contribuição para uma drenagem urbana mais sustentável na bacia estudada.

1.1. Justificativa

A cidade de Juiz de Fora convive historicamente com episódios recorrentes de inundações e alagamentos. Ao longo dos anos, o crescimento urbano intensificou a ocupação de áreas suscetíveis a riscos, favorecendo a ocorrência de escorregamentos em regiões de maior declividade e a ocupação de baixadas que dificultam o escoamento adequado das águas pluviais (UFJF, 2026). Além disso, o sistema de drenagem do município já apresenta limitações para comportar, com segurança, o volume de água gerado pela impermeabilização decorrente da expansão urbana (UFJF, 2026). Esse cenário é agravado pela canalização de cursos d'água, pois faz com que eles percam parte de suas condições naturais de escoamento, e pela redução de áreas capazes de absorver a água da chuva em razão da urbanização (TRIBUNA DE MINAS, 2025).

Em fevereiro de 2026, essas condições culminaram em um dos episódios pluviométricos mais severos registrados no município, marcado por altos volumes de precipitação, transbordamento do rio Paraibuna, perdas humanas e decretação de estado de calamidade pública por 180 dias (CNN BRASIL, 2026).

Apesar da existência de técnicas compensatórias amplamente discutidas na literatura, sua aplicação ainda ocorre de forma limitada em muitos municípios brasileiros. Já na cidade de Juiz de Fora, as ações voltadas à drenagem urbana estão mais ligadas a obras de remodelação de redes que objetivam a redução dos alagamentos, o aprimoramento da infraestrutura urbana e a segurança da população nos períodos de maior ocorrência de chuvas (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2025). Além disso o vertedouro que regula o nível do lago do parque da lajinha foi modernizado e adaptado através de uma obra em 2023 para que o lago passasse a ser utilizado como bacia de retenção de águas pluviais nos períodos de chuva, promovendo a retenção temporária de parte do volume escoado pelo bairro Aeroporto de maneira automática (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2023).

Também vale ressaltar os novos projetos de macrodrenagem que estão sendo desenvolvidos no município através do investimento garantido pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), por exemplo os para o bairro Santa Luzia e região que visam a construção de um reservatório, parque público multiuso que serve também como contenção das águas nos períodos das chuvas intensas, estação elevatória de drenagem para dar vazão à água após as chuvas, ampliação da canalização do córrego ao longo das avenidas e nova rede de microdrenagem com soluções sustentáveis, como os jardins de chuva (PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, 2026). Esse contexto sugere que as soluções convencionais de drenagem, isoladamente, têm se mostrado insuficientes para enfrentar os desafios associados à urbanização e à intensificação dos eventos extremos e também ressalta a busca para integrar cada vez mais soluções baseadas na natureza as realidades urbanas da cidade.

1.2. Organização do texto

O presente trabalho de conclusão de curso está estruturado em seis capítulos. Sendo que, o primeiro apresenta uma introdução ao tema, a justificativa para o desenvolvimento da pesquisa e a organização do trabalho.

O segundo contempla os objetivos geral e específicos que orientam o estudo.

No terceiro capítulo é apresentado o referencial teórico, abordando conceitos relevantes relacionados à drenagem urbana e às técnicas compensatórias. Além disso, é descrito sobre o *software* utilizado na modelagem hidrológica.

O quarto capítulo apresenta a metodologia adotada, detalhando os procedimentos realizados, os *softwares* empregados e as etapas de modelagem hidrológico-hidráulica desenvolvidas para análise da bacia hidrográfica do Ribeirão Yung, considerando cenários com e sem a aplicação de técnicas compensatórias.

No quinto são apresentados e discutidos os resultados obtidos, buscando analisar os possíveis efeitos da implementação das técnicas compensatórias sobre o comportamento hidrológico da bacia de estudo.

Por fim, o sexto capítulo reúne as conclusões obtidas a partir das análises realizadas, bem como as considerações finais acerca dos resultados encontrados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho possui como objetivo analisar o sistema de macrodrenagem urbana da bacia do Ribeirão Yung por meio de modelagem hidrológico-hidráulica no *software* SWMM para avaliar a bacia sem e com a aplicação de soluções baseadas na natureza, visando uma análise da eficiência das técnicas utilizadas.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Coletar e produzir dados referentes a bacia hidrográfica do Ribeirão Yung no *software* QGIS para posterior modelagem;
- ✓ Desenvolver a modelagem da bacia no *software* SWMM, com a finalidade de representar o comportamento do sistema de drenagem no cenário atual;
- ✓ Incluir as técnicas compensatórias biovaletas, jardim de chuva e bacias de retenção a fim de analisar o desempenho do sistema de macrodrenagem;
- ✓ Avaliar os impactos das técnicas compensatórias na redução dos picos de vazão, de modo a verificar a eficiência das soluções propostas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Drenagem urbana

A compreensão da drenagem urbana requer uma análise dos paradigmas históricos que orientaram as respostas técnicas e institucionais adotadas ao longo do tempo. Segundo Tucci (2008, 2012), a evolução do manejo das águas urbanas pode ser compreendida a partir de quatro fases, que refletem mudanças na forma como os problemas hídricos passaram a ser percebidos e enfrentados nas cidades.

A primeira delas, denominada fase pré-higienista foi predominante até o início do século XX, caracterizava-se pela ausência de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgoto, sendo comum o descarte em fossas ou diretamente nos cursos de drenagem, enquanto que o abastecimento de água ocorria a partir da fonte disponível mais próxima. Como consequência, eram frequentes os surtos de doenças, epidemias e elevadas taxas de mortalidade.

Em seguida, a fase higienista, predominante até a década de 1970, teve como principal objetivo afastar o esgoto das áreas habitadas e conduzir rapidamente o escoamento por meio da canalização dos cursos d'água. Embora essa abordagem tenha contribuído para a redução de doenças, também resultou na degradação dos rios e na permanência de problemas relacionados às inundações.

Posteriormente, entre as décadas de 1970 e 1990, desenvolveu-se a fase corretiva, marcada pela introdução do tratamento de esgoto doméstico e industrial, além da adoção de sistemas destinados ao amortecimento do escoamento superficial, contribuindo para a recuperação dos corpos hídricos. Apesar desses avanços, a poluição difusa permaneceu como um problema relevante.

Por fim, a fase do desenvolvimento sustentável, consolidada a partir da década de 1990, passou a incorporar medidas mais integradas, como o tratamento terciário de efluentes, o controle do escoamento pluvial e modelos de desenvolvimento urbano voltados à preservação dos sistemas naturais, buscando reduzir inundações, melhorar a qualidade ambiental e promover melhores condições de vida (TUCCI, 2008).

De acordo com Tucci (2012), a maior parte das cidades brasileiras ainda apresenta características associadas à fase higienista, principalmente em razão da

deficiência no tratamento de esgoto, da transferência dos problemas de inundação ao longo dos sistemas de drenagem e da ausência de controle adequado dos resíduos sólidos. O autor destaca ainda que apenas um número reduzido de municípios, como Porto Alegre, Brasília e Campo Grande, apresenta condições intermediárias entre a fase higienista e a corretiva.

3.2. Soluções baseadas na natureza

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) correspondem a intervenções que se inspiram ou utilizam processos naturais com o objetivo de tornar a gestão dos sistemas urbanos mais eficiente, ao mesmo tempo em que promovem benefícios sociais, ambientais e econômicos (European Commission, 2021 apud SILVEIRA; RODRIGUES; DORNELLES, 2025). No campo da drenagem urbana, as SbN se inserem por meio da infraestrutura verde, também conhecida como *Low Impact Development* (LID) ou desenvolvimento de Baixo Impacto que contribui para adaptar as cidades de modo que acomodem melhor as águas pluviais, colaborando para a resiliência urbana (CAMPOS, 2021).

Em contrapartida ao sistema convencional, que prioriza o rápido escoamento das águas para jusante, o sistema baseado em SbN trata a questão na origem, por meio de intervenções de menor porte e localmente adaptadas, promovendo uma convivência maior entre o espaço urbanizado e a natureza. Dessa forma, buscam diminuir o escoamento superficial, sobrecarregando menos o sistema de drenagem instalado, controlando a poluição difusa e aumentando a área filtrante (CAMPOS, 2021).

No contexto brasileiro, a intensificação da impermeabilização do solo, as mudanças climáticas, a degradação ambiental e a contaminação dos corpos hídricos, tem estimulado a adoção de abordagens mais sustentáveis. Essas iniciativas buscam aliviar a pressão sobre os sistemas tradicionais de drenagem, ao mesmo tempo em que promovem a melhoria da qualidade da água e aumentam a capacidade de adaptação das cidades frente a eventos extremos (SILVEIRA; RODRIGUES; DORNELLES, 2025). Apesar de a gestão pública, por meio dos Planos Diretores de Drenagem Urbana, propor a utilização de diversas técnicas de SbN, ainda assim, é fundamental adotar uma abordagem integrada, que leve em consideração a heterogeneidade dos espaços urbanos, envolva diferentes atores

sociais e respeite as especificidades de cada tipo de solução (SILVEIRA; RODRIGUES; DORNELLES, 2025).

3.3. Técnicas compensatórias

As técnicas compensatórias de drenagem urbana baseiam-se na retenção, infiltração e tratamento das águas pluviais o mais próximo possível do local onde ocorre a precipitação. Essa abordagem busca aproximar o comportamento hidrológico das condições naturais anteriores à urbanização, em contraste com o modelo tradicional, de caráter higienista, que prioriza o rápido escoamento das águas para jusante (SILVA *et al.*, 2020).

Essas técnicas podem ser divididas em medidas estruturais e não estruturais. As não estruturais dizem respeito a estratégias de planejamento, regulação e gestão, como legislações para controle de futuros desenvolvimentos e visam minimizar os impactos das inundações sem a necessidade de intervenções físicas. Por outro lado, as medidas estruturais envolvem obras e dispositivos de engenharia destinados a promover a infiltração, o armazenamento e o tratamento das águas pluviais, podendo ser aplicadas em diferentes escalas, desde o nível do lote até o sistema de macrodrenagem da bacia hidrográfica (TUCCI, 2003).

Dentre as técnicas estruturais, os sistemas de biorretenção se destacam por possuir uma utilização diversa, além de se tratar de soluções com elevado potencial, uma vez que promovem a interação com os processos naturais, conciliando a retenção das águas pluviais com a atenuação de poluentes (PGC, 2007 apud SILVA *et al.*, 2020). Exemplos de práticas de biorretenção citam-se os jardins de chuva, as biovaletas, os canteiros pluviais e as lagoas pluviais, que representam alternativas aos sistemas clássicos de drenagem convencional (SILVA *et al.*, 2020).

No âmbito das Soluções Baseadas na Natureza, essas estruturas se destacam por integrarem componentes naturais como vegetação, solo com capacidade de drenagem e materiais granulares, ao espaço urbano, atuando de forma complementar aos sistemas tradicionais de drenagem.

Na sequência, serão descritas algumas técnicas compensatórias estruturais.

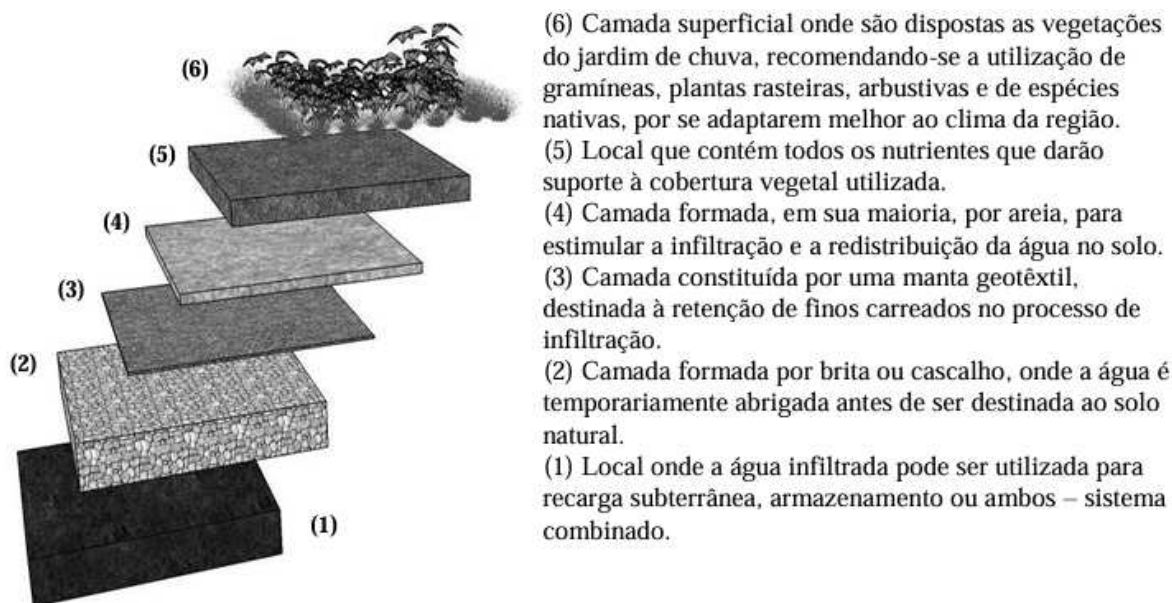
3.3.1. Jardins de chuva

Os jardins de chuva são depressões topográficas que coletam o escoamento superficial, sendo enquadradas como técnicas de controle na fonte, fundamentadas nos princípios da biorretenção e compensação das áreas impermeáveis (MELO *et al.*, 2014). Seu funcionamento combina três funções principais: retenção, filtração e infiltração. A retenção tem como objetivo armazenar temporariamente a água sobre a superfície, reduzindo a velocidade do escoamento e permitindo sua evaporação ou infiltração no solo. Paralelamente, ocorre a filtração, responsável por remover poluentes transportados pela água, como sólidos suspensos, nutrientes (nitratos e fósforo) e metais, incluindo o zinco (MELO *et al.*, 2014).

Do ponto de vista construtivo, os jardins de chuva são implantados em áreas escavadas sendo formados por camadas sucessivas que incluem material granular, substrato com matéria orgânica, manta geotêxtil e vegetação (MELO *et al.*, 2014). Ademais, a cobertura vegetal desempenha um papel essencial no funcionamento do sistema, pois contribui para a evapotranspiração, auxilia na remoção de determinados poluentes e, sobretudo, ajuda a manter a capacidade de infiltração ao longo do tempo (LE COUSTUMER *et al.*, 2012 apud MELO *et al.*, 2014).

No que se refere ao dimensionamento, os jardins de chuva são, em geral, aplicados a áreas de menor escala, sendo comum adotar como critério que sua área represente, no mínimo, 5% da superfície impermeável que contribui para o escoamento (CHRISTENSEN; SCHMIDT, 2008; LI; ZHAO, 2008; LI; CHE; GE, 2010; WINSTON *et al.*, 2010 apud MELO *et al.*, 2014).

Figura 1 - Estrutura básica para um jardim de chuva



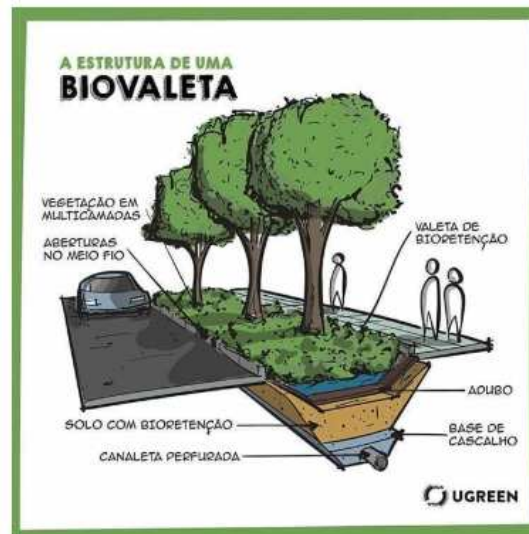
Fonte: <https://www.scielo.br/j/ac/a/3mKRYFjSkPdBkhdyVVGZZLL/?lang=pt>

3.3.2. Biovaletas

As biovaletas, também conhecidas por valetas de biorretenção vegetadas, consistem em depressões no terreno e possuem geometria linear, o que facilita sua implantação ao longo de vias urbanas e canteiros. Apesar de integrarem o conjunto de infraestruturas verdes, sua principal função está relacionada à condução do escoamento superficial retardando e filtrando a água que ao passar pelas camadas de solo drenante e cobertura vegetal tem sua velocidade reduzida além de sedimentos retidos e poluentes atenuados. Logo após, a água é encaminhada para outros dispositivos de drenagem ou infiltrada no solo.

Além dos benefícios hidrológicos, as biovaletas contribuem para a promoção da biodiversidade e estão inseridas no escopo das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), alinhando-se aos princípios de resiliência e sustentabilidade urbana (SILVEIRA, 2024).

Figura 2 - Demonstração de uma biovaleta.



Fonte: <https://inq.conquista.ifba.edu.br/v1/biovaletas-como-alternativa-sustentavel-para-o-escoamento-d-e-aguas-pluviais/>

3.3.3. Bacia de retenção

As bacias de retenção são estruturas utilizadas para armazenar temporariamente a água da chuva, objetivando reduzir o volume de água que segue para jusante em um curto intervalo de tempo. São geralmente implantadas em áreas rebaixadas ou escavadas no terreno, possuem um dispositivo de saída controlada, normalmente um orifício no fundo, que permite a liberação gradual da água acumulada, contribuindo para a redução dos picos de vazão e buscando aproximar as condições do escoamento às existentes antes da urbanização (RODRÍGUEZ; TEIXEIRA, 2021). Além disso, se houver um tempo adequado de armazenamento isto também pode contribuir para a melhoria da qualidade da água, já que favorece a deposição de partículas sólidas transportadas pelo escoamento superficial (LAWRENCE *et al.*, 1996 apud RODRÍGUEZ; TEIXEIRA, 2021; BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015 apud RODRÍGUEZ; TEIXEIRA, 2021).

Ademais, quando aplicados em escala de lote, os reservatórios de retenção podem ser utilizados como medidas estruturais relacionadas ao conceito de *Low Impact Development* (LID), ajudando no controle das águas pluviais ainda próximas do local onde são geradas. Sendo assim, podem contribuir para um melhor gerenciamento do escoamento na bacia hidrográfica, reduzindo a sobrecarga do sistema de drenagem e ajudando a diminuir problemas como alagamentos e inundações (LIMA NETO *et al.*, 2024).

Figura 3 - Bacia de retenção.



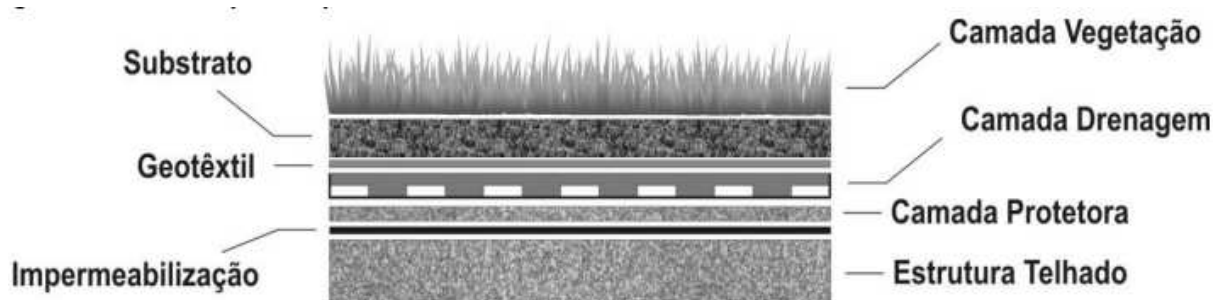
Fonte: <https://www.solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>

3.3.4. Telhados verdes

Os telhados verdes correspondem a sistemas de cobertura vegetada que transformam a superfície de edificações em espaços com múltiplas funções, sendo compostos por diferentes camadas, como vegetação, substrato, geotêxtil, camada de drenagem e sistema de impermeabilização (TASSI *et al.*, 2014). Esse sistema por estar inserido no contexto do Desenvolvimento de Baixo Impacto (DBI), se baseia na gestão das águas pluviais próxima ao local de origem, buscando reproduzir funções naturais que foram alteradas pelo processo de urbanização. (TASSI *et al.*, 2014). Nesse sentido, tanto a vegetação quanto o substrato contribuem para o controle do escoamento, atuando por meio da interceptação da chuva, do armazenamento de água no solo e da evapotranspiração, o que ajuda a reduzir os efeitos da impermeabilização (YANG; YU; GONG, 2008 apud TASSI *et al.*, 2014).

Outrossim, os telhados verdes podem ser classificados como extensivos e intensivos. Os sistemas extensivos possuem menor peso e menor necessidade de manutenção pois apresentam baixa espessura de substrato, geralmente variando entre 5 cm e 15 cm. Além disso, comportam plantas adaptadas a condições climáticas mais adversas e são amplamente indicadas para edificações urbanas (YANG; YU; GONG, 2008 apud TASSI *et al.*, 2014). Já os sistemas intensivos possuem maior carga e maiores manutenções uma vez que por apresentarem camadas de solo mais espessas, de 15 cm a 90 cm, o uso de plantas de maior porte como arbustos e árvores, é permitido (TASSI *et al.*, 2014).

Figura 4 - Camadas que compõem o telhado verde.



Fonte: <https://www.scielo.br/i/ac/a/SLTzVMTPCbKMQxxTb37FzCr/?format=pdf&lang=pt>

3.3.5. Pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis são uma alternativa utilizada para reduzir o escoamento superficial em áreas urbanas, permitindo que parte da água da chuva infiltre no solo em vez de ser conduzida diretamente ao sistema de drenagem. Entre os principais tipos estão o asfalto poroso, o concreto poroso e os blocos vazados preenchidos com material granular ou vegetação (URBONAS; STAHLRE, 1993 apud ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

De modo geral, a utilização desses pavimentos pode contribuir para a redução dos volumes escoados e aproximar as condições hidrológicas urbanas das observadas antes do processo de urbanização. Entretanto, sua eficiência depende das características do solo, do nível do lençol freático e da realização de manutenção periódica, necessária para evitar o entupimento dos poros e a perda da capacidade de infiltração (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

Além disso, em simulações experimentais, observou-se que os pavimentos permeáveis apresentaram escoamento superficial muito reduzido quando comparados a superfícies impermeáveis, demonstrando potencial para auxiliar no controle das águas pluviais urbanas (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

Figura 5 - Tipo de pavimento permeável.



Fonte: <https://digital.concreteshow.com.br/produtos/tecnologia-por-trs-do-pavimento-permeavel/>

3.4. Modelagem hidrológica

Para a avaliação quantitativa da eficiência das técnicas de SBN escolhidas (jardins de chuva, biovaletas e bacias de retenção) foi utilizado o *Storm Water Management Model* (SWMM) desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), tratando-se de um modelo dinâmico de chuva-vazão amplamente utilizado no planejamento, análise e projeto de sistemas de drenagem em áreas urbanas (ROSSMAN; SIMON, 2022). O modelo opera por meio de um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos, enquanto seu módulo hidráulico simula o percurso dessas águas por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento, bombas e elementos de regulação. Além disso, trabalha de forma integrada ao sistema de drenagem convencional, permitindo comparar cenários com e sem a implantação das SBN e avaliar numericamente os efeitos dessas intervenções sobre os hidrogramas de cheia da bacia (ROSSMAN; SIMON, 2022).

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Ribeirão Yung (Figura 6), localizada no município de Juiz de Fora que possui área territorial de 1.435,75 km² e população estimada de 540.756 habitantes, segundo o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), situada no estado de Minas Gerais na Zona da Mata Mineira.

Ademais, a referida bacia apresenta características mistas, com predomínio de áreas rurais nas partes mais a montante e presença urbana significativa em sua porção mais a jusante.

Figura 6 - Limite da bacia do Ribeirão Yung, em vermelho.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS

4.2. Softwares utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados três *softwares* principais: o QGIS, para processamento e análise dos dados geoespaciais da bacia hidrográfica, o SWMM (*Storm Water Management Model*), para modelagem hidrológica e hidráulica do escoamento superficial e por fim o

Google Earth Pro para retirada de dados de comprimento de escoamento e coordenadas geográficas.

4.2.1. QGIS

O QGIS é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto, gratuito e de ampla utilização no meio científico. Esse *software* possibilita o processamento de dados geoespaciais em diferentes formatos, incluindo vetores, rasters e bases de dados, sendo amplamente utilizado em análises ambientais e de planejamento urbano e rural.

Neste estudo, o QGIS foi empregado em grande parte das etapas de preparação dos dados utilizados na modelagem hidrológica e hidráulica no SWMM. O *software* foi utilizado para o processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) e para a geração da rede de drenagem, com auxílio das ferramentas do GRASS GIS. Também foi empregado na delimitação e nos ajustes das sub-bacias, na obtenção de parâmetros morfométricos, como área, declividade e cotas altimétricas, no mapeamento do uso e cobertura do solo por meio do plugin MapBiomas, e possibilitou a identificação dos tipos de solo a partir dos dados disponibilizados pelo IBGE.

4.2.2. SWMM 5.2

O SWMM (*Storm Water Management Model*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), é um programa de modelagem dinâmica que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial em bacias hidrográficas urbanas e rurais. Tal programa opera com um conjunto de sub-bacias que recebem precipitação e geram escoamento, permitindo o acompanhamento da vazão, altura de escoamento e qualidade da água ao longo do tempo simulado. Além disso, inclui a capacidade de modelar o desempenho hidrológico de Soluções Baseadas na Natureza, como jardins de chuva, biovaletas e bacias de retenção que foram as técnicas compensatórias do presente estudo. Por esse motivo o SWMM foi escolhido uma vez que com ele é possível comparar o cenário atual com diferentes configurações de implantação dessas soluções, analisando sua eficácia na redução dos picos de vazão e, conseqüentemente, na mitigação dos problemas relacionados ao escoamento superficial.

4.3. Modelagem no QGIS

4.3.1. Obtenção dos dados de entrada

Primeiramente foram obtidos os dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) através do portal TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Além disso, o arquivo shapefile com a delimitação da bacia hidrográfica do Ribeirão Yung foi obtido junto à Prefeitura Municipal de Juiz de Fora e todos os dados foram trabalhados no sistema de referência SIRGAS 2000, projeção UTM fuso 23S (EPSG:31983).

4.3.2. Delimitação da bacia e sub-bacias

A delimitação da bacia hidrográfica e de suas sub-bacias foi realizada a partir do processamento do MDE no ambiente GRASS GIS, integrado ao QGIS. Inicialmente, as inconsistências do MDE foram corrigidas pelo comando `r.fill` e em seguida, com o comando `r.watershed` foram gerados a rede de drenagem que se trata do provável caminho das águas, e o arquivo de direção de fluxo. Por fim, a delimitação de cada sub-bacia foi realizada com o comando `r.water.outlet`, definindo-se os exutórios de cada unidade hidrográfica com base na análise do fluxo acumulado.

As sub-bacias geradas apresentaram sobreposições geométricas, as quais foram corrigidas por meio da ferramenta Diferença (*Difference*), subtraindo as áreas sobrepostas de cada sub-bacia, garantindo que cada porção do território pertencesse exclusivamente a uma única unidade hidrográfica. Enfim, foram obtidas quatro sub-bacias (Figura 7), denominadas SUB1, SUB2, SUB3 e SUB4, com fluxo em cascata na seguinte ordem: SUB1 para a SUB3, SUB3 para a SUB2 e SUB2 para a SUB4, sendo SUB4 o ponto de saída da bacia.

Figura 7 - Cursos d'água e divisão das sub-bacias da bacia do Ribeirão Yung.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS

4.3.3. Parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos de cada sub-bacia foram extraídos com o auxílio do QGIS, sendo as áreas calculadas diretamente pela ferramenta de geometria do *software* e as cotas máximas e mínimas obtidas a partir do MDE. Já o comprimento de escoamento foi medido pelo *Google Earth Pro*, em virtude de a rede de drenagem extraída do MDE apresentar padrão matricial, o que superestima os comprimentos pelo traçado em zigue-zague dos pixels.

Por fim, a largura característica foi calculada pela razão entre a área e o maior comprimento de cada sub-bacia e a declividade pela diferença das cotas máxima e mínima dividida pelo comprimento de escoamento (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização das sub-bacias da bacia do Ribeirão Yung.

	Sub bacia 1	Sub bacia 2	Sub bacia 3	Sub bacia 4
ÁREA (ha)	462,18	567,32	649,53	278,47
COMPRIMENTO DE ESCOAMENTO (m)	4662,00	5058,00	5900,00	2700,00
COTA MÁXIMA (m)	879,567	890,633	872,95	816,432
COTA MÍNIMA (m)	793,817	720,08	747,913	682,749
DECLIVIDADE	1,84	3,37	2,12	4,95
% IMPERMEÁVEL	6,14	24,92	8,37	79,94
LARGURA CARACTERÍSTICA (m)	991,37	1121,63	1100,90	1031,38

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS.

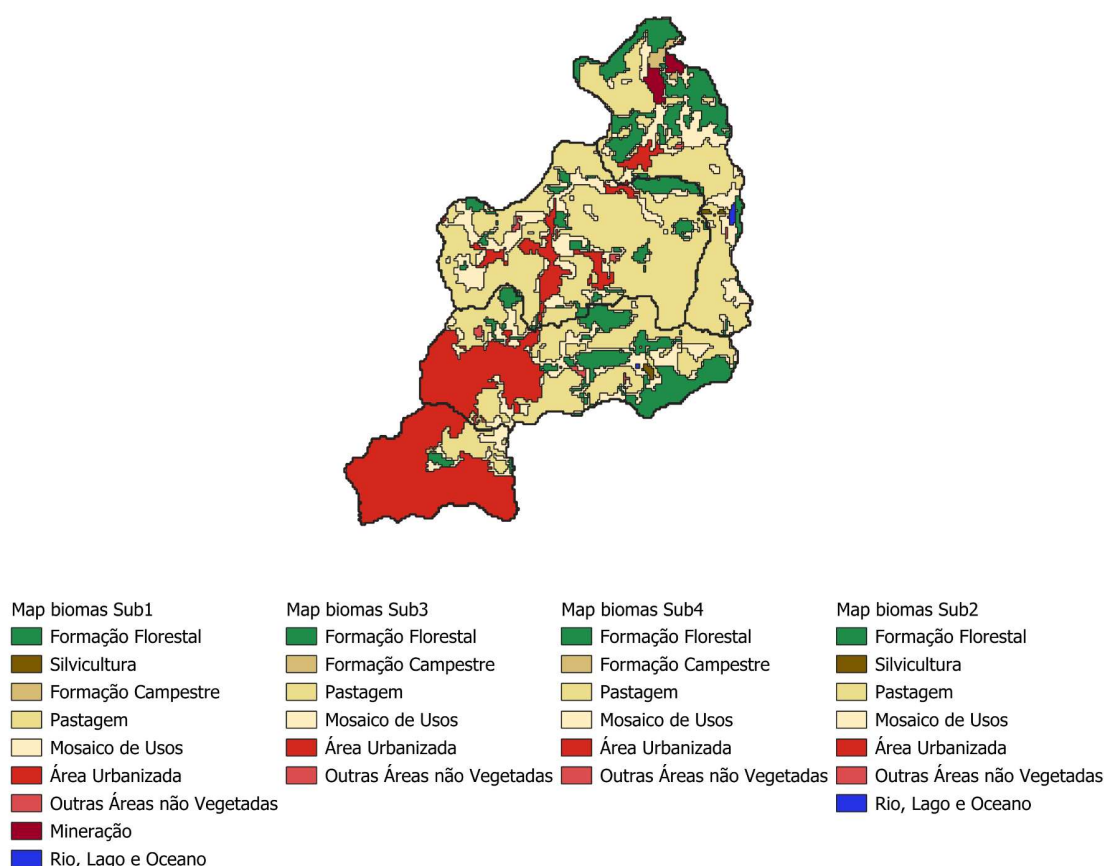
4.3.4. Uso e ocupação do solo

O mapeamento do uso e ocupação do solo foi realizado com o auxílio do *plugin* MapBiomas *Collection*, disponível no QGIS, que fornece dados de cobertura da terra em escala anual para o território brasileiro.

Para cada sub-bacia as classes de uso identificadas foram: formação florestal, silvicultura, formação campestre, pastagem, mosaico de usos, área urbanizada, outras áreas não vegetadas, mineração e corpos d'água (rio, lago e oceano) (Figura 8), sendo as áreas para cada tipo apresentadas na Tabela 2.

Ademais, uma sugestão para pesquisas futuras é revisar o mapa de uso e ocupação do solo, no próprio QGIS por meio da função: classificação supervisionada.

Figura 8 - Uso e ocupação do solo para a bacia do Ribeirão Yung.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS

Já o percentual de impermeabilidade de cada sub-bacia foi calculado dividindo a área urbanizada pela área total da sub-bacia (Tabela 1), sendo que para o cálculo os usos foram separados em Vegetação, Pastagem e Área Urbana e suas áreas somadas conforme cada classificação (Tabela 3).

Tabela 2 - Uso e ocupação do solo nas sub-bacias (ha).

Uso do Solo	SUB1 (ha)	SUB2 (ha)	SUB3 (ha)	SUB4 (ha)
Formação florestal	112,53	111,57	51,18	5,08
Silvicultura	1,40	1,93	0,00	0,00
Formação campestre	8,15	0,00	0,53	0,79
Pastagem	214,80	214,19	427,95	29,36
Mosaico de usos	91,76	96,67	115,51	17,97
Área urbanizada	11,83	136,46	51,27	222,52

Uso do Solo	SUB1 (ha)	SUB2 (ha)	SUB3 (ha)	SUB4 (ha)
Outras não vegetadas	1,40	4,91	3,07	0,09
Mineração	15,16	0,00	0,00	0,00
Rio, lago e oceano	2,28	0,35	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do Map Biomas/QGIS.

Tabela 3 - Área de uso e ocupação do solo separados por classe.

Uso do Solo	SUB1 (ha)	SUB2 (ha)	SUB3 (ha)	SUB4 (ha)
Vegetação	120,68	111,57	51,70	5,87
Pastagem	307,96	312,79	543,46	47,33
Área urbanizada	28,40	141,36	54,34	222,61

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do Map Biomas/QGIS.

4.4. Dados de precipitação

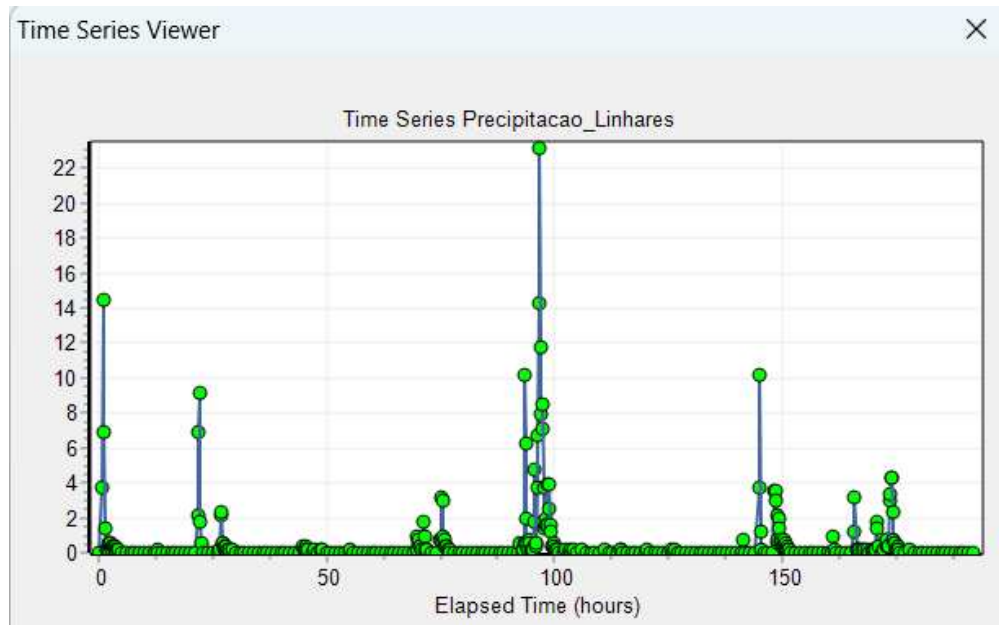
Os dados de precipitação utilizados na simulação foram obtidos junto ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), a partir da estação pluviométrica Linhares (código 313670233A), localizada nas coordenadas $-21,720274^\circ$ de latitude e $-43,311726^\circ$ de longitude, dentro dos limites da bacia hidrográfica estudada. Os dados foram coletados em intervalos de 10 minutos para o período de 20 a 27 de fevereiro de 2026, totalizando uma precipitação acumulada de 296,48 mm no período.

Este intervalo de dias foi utilizado por ter ocorrido nele uma sequência de temporais que atingiu a cidade entre os dias 23 e 24, causando volumes históricos de precipitações no município de Juiz de Fora, com destaque para o evento crítico ocorrido no dia 24 de fevereiro de 2026, quando foi registrado o maior valor pontual do período, de 23,15 mm em 10 minutos, às 00:50h. Por esse motivo, este evento foi adotado como referência para a análise do comportamento hidrológico da bacia.

Além disso, foi adotado dados de uma única estação pluviométrica para simplificação do estudo e por se tratar de um evento único em que o município como um todo sofreu com altos índices pluviométricos, porém vale ressaltar que essa escolha pode introduzir incertezas nos resultados,

especialmente considerando que eventos convectivos típicos do verão em Juiz de Fora apresentam alta variabilidade espacial.

Figura 9 - Precipitação x hora do dia 20 a 27 de fevereiro de 2026, estação 313670233A.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do CEMADEN.

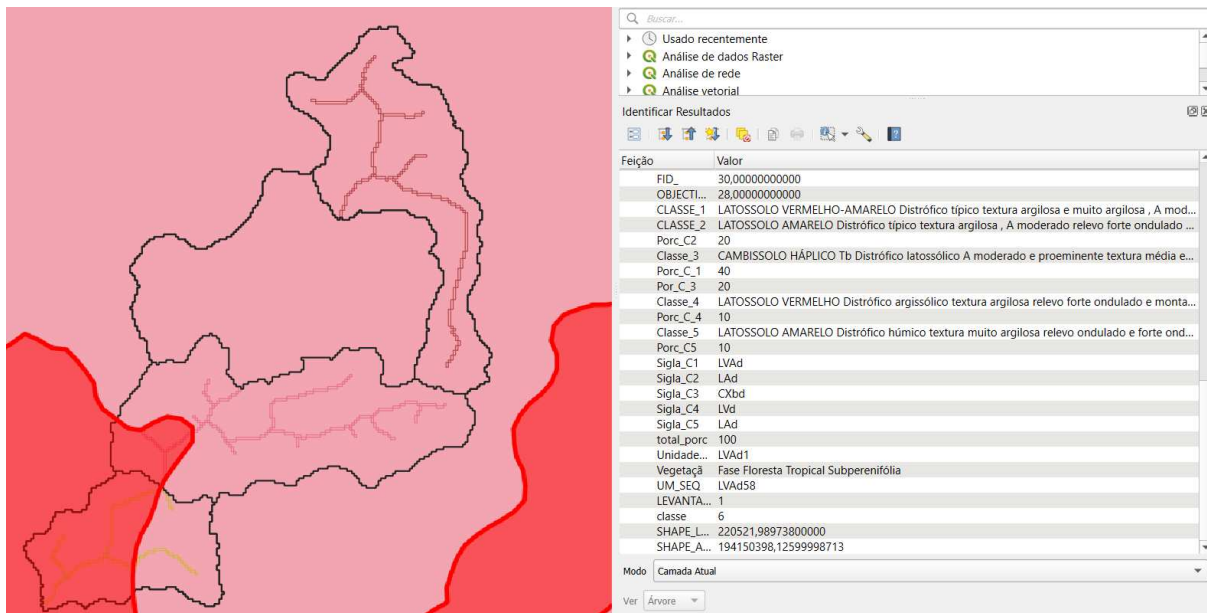
4.5. Caracterização pedológica e grupos hidrológicos

O mapeamento pedológico da bacia foi obtido a partir do shapefile de solos disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e reprojetoado para o sistema de referência EPSG:31983 no QGIS. Com isso, a partir da identificação das feições de solo sobrepostas à área da bacia, verificou-se a ocorrência de duas unidades pedológicas predominantes: Latossolos (Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo) e Afloramentos Rochosos, Dunas e Áreas Urbanas.

Para a determinação dos grupos hidrológicos de solo, necessários ao cálculo da Curva Número, adotou-se a classificação do NRCS (National Resources Conservation Service), apresentada no Manual do SWMM (ROSSMAN, 2005).

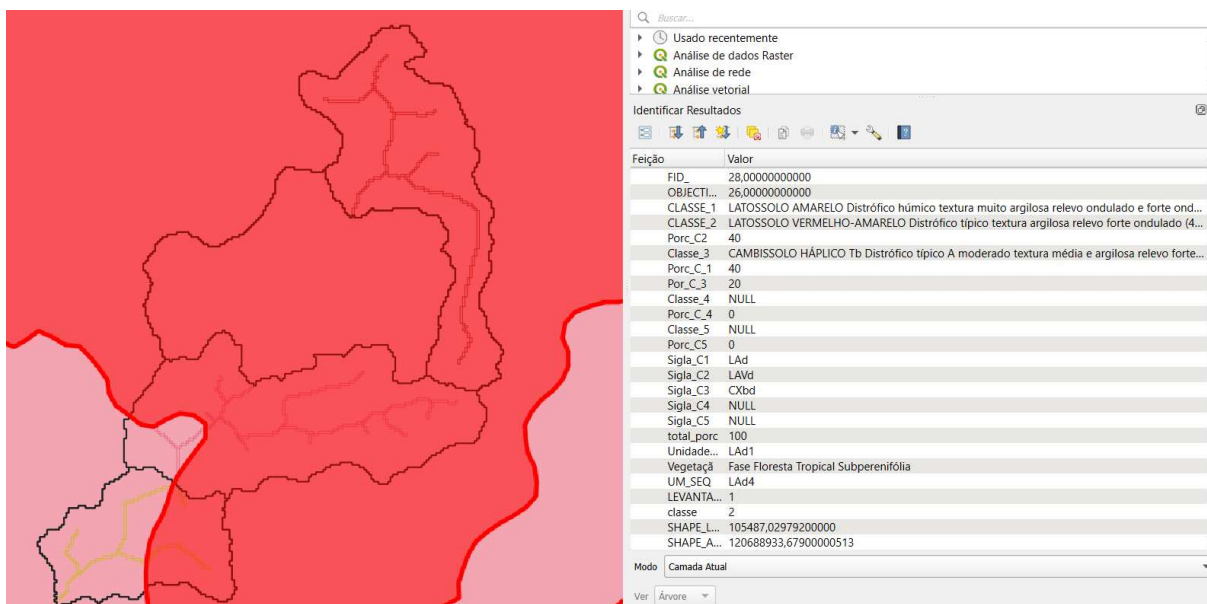
Com base nas características físicas dos solos identificados, estabeleceu-se a seguinte composição para a bacia: 80% Latossolos Grupo B (Figura 10) e 20% Cambissolos Grupo C (Figura 11).

Figura 10 - Latossolos - Grupo B.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS

Figura 11 - Cambissolos - Grupo C.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do QGIS

4.6. Modelagem no SWMM

4.6.1. Configuração geral da simulação

Inicialmente, as opções de simulação foram configuradas com modelo de infiltração pelo método da Curva Número do SCS (*Soil Conservation*

Service), modelo do processo físico por Propagação de Fluxo e modelo de propagação de fluxo por Onda Dinâmica.

4.6.2. Pluviômetro e dados de precipitação

Os dados de chuva da estação Linhares (CEMADEN), foram inseridos como série temporal (*Time Series*) em formato de volume (mm) e como dito anteriormente, com o período de simulação dos dias 20 a 27 de fevereiro de 2026, com passo de tempo de relatório de 10 minutos e passo de tempo de roteamento de 60 segundos.

Além disso, o tempo de dias secos antecedentes (*Antecedent Dry Days*) foi definido como 2 dias, com base na análise dos dados pluviométricos que indicaram precipitações esparsas e de baixas intensidades nos dias 18 e 19 de fevereiro, embora esses registros indiquem que o solo não estava completamente seco, devido a baixa magnitude das precipitações, considerou-se que o impacto na umidade antecedente do solo seria pouco expressivo para os resultados da simulação. Por fim, um pluviômetro virtual (*Rain Gage*) foi criado no modelo e associado a todas as sub-bacias.

4.6.3. Parâmetros das sub-bacias

Cada sub-bacia foi inserida no modelo com seus respectivos parâmetros morfométricos e de cobertura do solo. O coeficiente de *Manning* para as áreas impermeáveis foi adotado como $n = 0,011$ (asfalto liso) para todas as sub-bacias, conforme Figura 12 de *Manning* disponível no Manual do SWMM.

Já para as áreas permeáveis, o coeficiente de *Manning* foi calculado através de uma média ponderada somando a multiplicação de cada área de usos do solo pelo coeficiente de *Manning* e no fim dividindo pela soma das áreas de usos do solo para cada sub-bacia (Tabela 4).

Figura 12 - 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 5.2, p. 170.

Tabela 4 - Coeficientes de Manning médios ponderados por sub-bacia.

Sub-bacia	Manning para áreas impermeáveis	Manning para áreas permeáveis (ponderado)	Ponto de saída da sub-bacia
SUB1	0,011	0,215	NO1
SUB2	0,011	0,217	NO2
SUB3	0,011	0,171	NO3
SUB4	0,011	0,174	NO4

Fonte: Elaborado pela autora.

4.6.4. Curva número (CN)

Os valores de CN foram extraídos da Figura 13 do Manual do SWMM (ROSSMAN, 2005).

Figura 13 - Relação entre o uso da terra e a classe hidrológica do solo para definição da Curva Número.

Descrição do Uso de Terra	Classes Hidrológicas do Solo - NRCS			
	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 5.2, p. 170.

Como a composição pedológica da bacia apresentou proporção de 80% Grupo Hidrológico B e 20% Grupo C, o CN de cada uso do solo foi ponderado entre os dois grupos segundo a equação apresentada abaixo.

$$CN_{solo} = (0,80 * CN_b) + (0,20 * CN_c)$$

Por fim o CN ponderado final de cada sub-bacia foi calculado conforme a equação apresentada a seguir:

$$CN_{ponderado} = (\Sigma(CN_{solo} * \text{Área}))/\text{Área permeável total}$$

Tabela 5 - Curva Número.

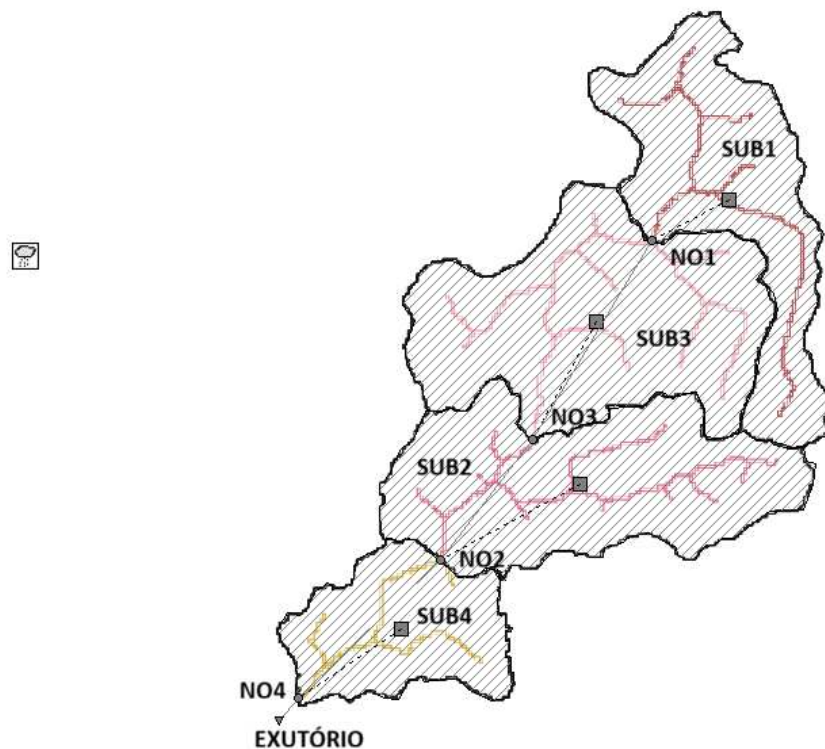
Sub-bacia	Somatório (CN solo * Área)	Somatório Área Permeável (ha)	CN ponderado
SUB1	27795,9	428,64	65
SUB2	27610,4	424,36	65
SUB3	39066,2	595,17	66
SUB4	3586,3	53,20	67

Fonte: Elaborado pela autora.

4.6.5. Nós, condutos e exutório

A rede de drenagem de cada sub-bacia foi representada por quatro nós de junção (NO1, NO2, NO3 e NO4), um exutório (EXUTORIO) e quatro condutos conectando os nós em sequência, seguindo a ordem de fluxo em cascata da bacia (Figura 14). Ademais, as cotas de fundo de cada nó foram definidas com base nas cotas mínimas das respectivas sub-bacias. Já a do exutório foi arbitrada para que ele e o NO4 não ficassem sobrepostos e isso acabasse comprometendo a modelagem, por isso foi adotado uma distância de dez metros entre eles (Tabela 6).

Figura 14 - Definição de nós, condutos e exutório.



Fonte: Elaborado pela autora.

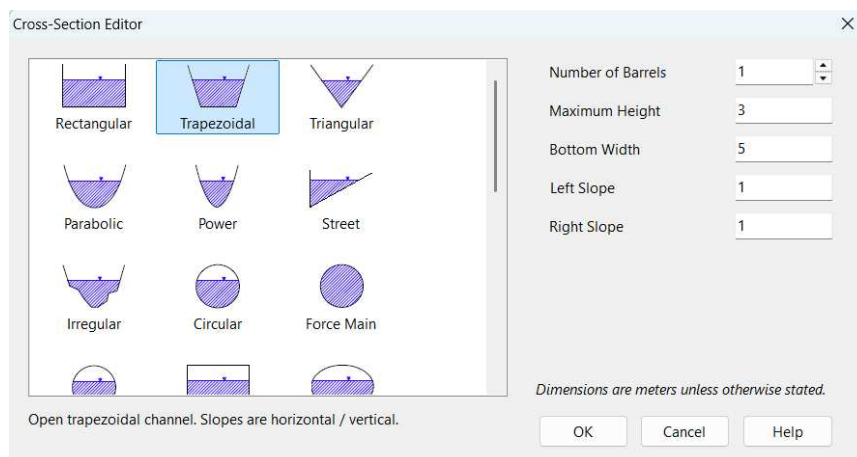
Tabela 6 - Parâmetros dos nós de junção.

Nó	Cota de Fundo (m)	Sub-bacia associada
NO1	793,82	SUB1
NO2	720,08	SUB2
NO3	747,91	SUB3
NO4	682,75	SUB4
EXUTORIO	682,00	Saída da bacia

Fonte: Elaborado pela autora.

Os condutos foram modelados com seção transversal trapezoidal (Figura 15), e tiveram suas dimensões adotadas devido a limitação de dados e a complexidade da obtenção deles em campo devido à extensão, construções nas margens e dificuldade de acesso em algumas regiões. Sendo importante ressaltar que o canal possui sua parte mais a jusante toda canalizada e subterrânea, porém foi adotado o canal todo como conduto aberto e com altura de 3,0 m e taludes laterais de 1:1, já a largura de fundo de aproximadamente 5,0 m foi medida no exutório do rio, utilizando o *Google Earth Pro*, sendo essa uma limitação do estudo.

Figura 15 - Seção transversal dos condutos.



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM.

O coeficiente de *Manning* para os condutos foi definido como $n = 0,05$, correspondente a canais naturais de pequeno porte com seção razoavelmente regular, conforme a Figura 16.

Por fim, os comprimentos dos condutos foram definidos com base no comprimento de escoamento de cada sub-bacia (Tabela 7).

Figura 16 - 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 5.2, p. 172.

Tabela 7 - Parâmetros dos condutos.

Conduto	Saída	Chegada	Comprimento (m)	Seção	Manning n
C1	NO1	NO3	4.662	Trapezoidal	0,05
C2	NO3	NO2	5.058	Trapezoidal	0,05
C3	NO2	NO4	5.900	Trapezoidal	0,05
C4	NO4	EXUTORIO	10	Trapezoidal	0,05

Fonte: Elaborado pela autora.

4.7. Soluções baseadas na natureza

Primeiramente, o mapeamento das áreas de implantação das biovaletas, jardins de chuva e bacias de retenção foi realizado com o auxílio do *software Google Earth Pro*, por meio de medições visuais e uso da ferramenta régua. Ademais, as áreas de formato regular foram calculadas pelo produto entre comprimento e largura, enquanto as áreas de formato irregular, incluindo a praças

e regiões amplas, foram obtidas diretamente pela ferramenta de medição de área do *Google Earth Pro*.

Para as bacias de retenção foram priorizadas áreas nos cursos d'água ou muito próximas, e de menor declividade onde as condições topográficas são mais favoráveis à implantação de estruturas de retenção. Já para as biovaletas e os jardins de chuva foram escolhidas praças, espaços inutilizados e por fim calçadas das ruas e avenidas principais mais próximas do ribeirão para simplificação do estudo já que a bacia possui grande dimensão e um número elevado de ruas, além do fato de que a urbanização na região se deu de forma desordenada e muitos logradouros possuem calçadas de largura inferior a necessária para implantação das soluções.

As ruas onde foram implementadas as biovaletas e os jardim de chuva são: Diva Garcia, João Henrique Vila Real, Vitorino Braga, Nossa Senhora do Líbano, do Monte, Garibalde Campinhos, Professor Lander e Thiago Ramon de Freitas Ferreira.

4.7.1. Critérios para dimensionamento

Tendo em vista que o dimensionamento detalhado de cada solução baseada na natureza escolhida envolve procedimentos que estão fora do escopo deste trabalho, foram estabelecidas dimensões padronizadas para cada tipo de intervenção.

Para as biovaletas, foi adotada largura padronizada de 0,80 m e profundidade de 0,30 m, com comprimento variável conforme o trecho de via disponível. Vale ressaltar que foram descontadas as interferências existentes como postes de iluminação, entradas de garagem e bocas de lobo.

Já para os jardins de chuva, foi adotada largura padronizada de 1,50 m e profundidade de 0,30 m, com comprimento variável para os de formato linear e área medida pelo *Google Earth Pro* para os de formato irregular.

Por fim, para as bacias de retenção, foi adotada profundidade padronizada de 1,50 m, com área de superfície medida pelo *Google Earth Pro* em cada local identificado reduzindo a incidência de sistemas de bombeamento.

4.7.2. Áreas de implantação por sub-bacia

Ademais, as SBN foram distribuídas nas sub-bacias com base nas características de uso do solo, declividade e disponibilidade de espaço identificado. A divisão ocorreu da seguinte maneira: SUB1 somente com quatro bacias de retenção, a SUB2 com quatro bacias de retenção, dez biovaletas e seis jardins de chuva, a SUB3 com quatro bacias de retenção e uma biovaleta e a SUB4 com uma bacia de retenção, trinta e cinco biovaletas e dezessete jardins de chuva.

Outrossim, a localização de cada Sbn está representada através das coordenadas obtidas pelo *Google Earth Pro* (Tabela 8). Os dados de áreas totais por sub-bacia e técnica compensatória estão listados na Tabela 9. Por fim, para o cálculo da porcentagem de área impermeável tratada foi realizada a divisão entre a área total da solução pela área impermeável da sub-bacia (Tabela 10).

Tabela 8 - Coordenadas das técnicas compensatórias e dados por sub-bacia.

Solução	Área unitária (m²)	Área total (m²)	Largura adotada (m)	Comprime. (m)	Profundid. adotada (m)	Coordenadas	
						Latitude	Longitude
Bacias de retenção SUB1 - 1	340,00	340,00	-	-	1,50	-21.706227°	-43.308144°
Bacias de retenção SUB1 - 2	993,00	993,00	-	-	1,50	-21.706565°	-43.305748°
Bacias de retenção SUB1 - 3	588,00	588,00	-	-	1,50	-21.709919°	-43.296817°
Bacias de retenção SUB1 - 4	4835,00	4835,00	-	-	1,50	-21.700054°	-43.307117°
Bacias de retenção SUB3 - 1	268,00	1555,00	-	-	1,50	-21.710713°	-43.311929°
Bacias de retenção SUB3 - 2	399,00		-	-	1,50	-21.713542°	-43.309497°
Bacias de retenção SUB3 - 3	705,00		-	-	1,50	-21.710733°	-43.315061°
Bacias de retenção SUB3 - 4	183,00		-	-	1,50	-21.721007°	-43.321834°

Bacias de detenção SUB2 - 1	10403,00	12273,00	-	-	1,50	-21.731233°	-43.326385°
Bacias de detenção SUB2 - 2	237,00		-	-	1,50	-21.733098°	-43.326722°
Bacias de detenção SUB2 - 3	692,00		-	-	1,50	-21.735053°	-43.315195°
Bacias de detenção SUB2 - 4	941,00		-	-	1,50	-21.734272°	-43.319930°
Bacias de detenção SUB4 - 1	687,00	687,00	-	-	1,50	-21.741499°	-43.334975°
Biovaletas SUB3 - 1	68,00	68,00	0,80	85,00	0,30	-21.709720°	-43.310791°
Biovaletas SUB2 - 1	8,00	287,20	0,80	10,00	0,30	-21.735210°	-43.329522°
Biovaletas SUB2 - 2	37,60		0,80	47,00	0,30	-21.735418°	-43.329637°
Biovaletas SUB2 - 3	52,00		0,80	65,00	0,30	-21.735938°	-43.329948°
Biovaletas SUB2 - 4	20,00		0,80	25,00	0,30	-21.736214°	-43.330396°
Biovaletas SUB2 - 5	5,60		0,80	7,00	0,30	-21.737753°	-43.331809°
Biovaletas SUB2 - 6	78,40		0,80	98,00	0,30	-21.739198°	-43.332196°
Biovaletas SUB2 - 7	12,80		0,80	16,00	0,30	-21.739683°	-43.332190°
Biovaletas SUB2 - 8	29,60		0,80	37,00	0,30	-21.739903°	-43.332298°
Biovaletas SUB2 - 9	24,80		0,80	31,00	0,30	-21.740183°	-43.332451°
Biovaletas SUB2 - 10	18,40		0,80	23,00	0,30	-21.740435°	-43.332493°
Biovaletas SUB4 - 1	34,40	748,80	0,80	43,00	0,30	-21.741279°	-43.333226°
Biovaletas SUB4 - 2	32,80		0,80	41,00	0,30	-21.741309°	-43.333633°
Biovaletas SUB4 - 3	34,40		0,80	43,00	0,30	-21.741416°	-43.334048°

Biovaletas SUB4 - 4	11,20		0,80	14,00	0,30	-21.741503°	-43.334327°
Biovaletas SUB4 - 5	21,60		0,80	27,00	0,30	-21.741570°	-43.334530°
Biovaletas SUB4 - 6	21,60		0,80	27,00	0,30	-21.741646°	-43.334779°
Biovaletas SUB4 - 7	12,00		0,80	15,00	0,30	-21.741719°	-43.334998°
Biovaletas SUB4 - 8	21,60		0,80	27,00	0,30	-21.741814°	-43.335206°
Biovaletas SUB4 - 9	30,40		0,80	38,00	0,30	-21.741984°	-43.335470°
Biovaletas SUB4 - 10	36,00		0,80	45,00	0,30	-21.742189°	-43.335797°
Biovaletas SUB4 - 11	34,40		0,80	43,00	0,30	-21.742358°	-43.336203°
Biovaletas SUB4 - 12	11,20		0,80	14,00	0,30	-21.742488°	-43.336507°
Biovaletas SUB4 - 13	15,20		0,80	19,00	0,30	-21.742572°	-43.336719°
Biovaletas SUB4 - 14	27,20		0,80	34,00	0,30	-21.742618°	-43.337018°
Biovaletas SUB4 - 15	24,00		0,80	30,00	0,30	-21.742641°	-43.337359°
Biovaletas SUB4 - 16	15,20		0,80	19,00	0,30	-21.742733°	-43.337601°
Biovaletas SUB4 - 17	35,20		0,80	44,00	0,30	-21.742913°	-43.337910°
Biovaletas SUB4 - 18	11,20		0,80	14,00	0,30	-21.743004°	-43.338240°
Biovaletas SUB4 - 19	14,40		0,80	18,00	0,30	-21.743102°	-43.338360°
Biovaletas SUB4 - 20	40,00		0,80	50,00	0,30	-21.743396°	-43.338415°
Biovaletas SUB4 - 21	16,80		0,80	21,00	0,30	-21.743806°	-43.338427°
Biovaletas SUB4 - 22	27,20		0,80	34,00	0,30	-21.744086°	-43.338288°
Biovaletas SUB4 - 23	28,00		0,80	35,00	0,30	-21.744457°	-43.338053°
Biovaletas SUB4 - 24	29,60		0,80	37,00	0,30	-21.744730°	-43.337926°

Biovaletas SUB4 - 25	27,20		0,80	34,00	0,30	-21.745066°	-43.337879°
Biovaletas SUB4 - 26	12,00		0,80	15,00	0,30	-21.745317°	-43.337934°
Biovaletas SUB4 - 27	21,60		0,80	27,00	0,30	-21.745759°	-43.338074°
Biovaletas SUB4 - 28	14,40		0,80	18,00	0,30	-21.745960°	-43.338144°
Biovaletas SUB4 - 29	26,40		0,80	33,00	0,30	-21.748227°	-43.339075°
Biovaletas SUB4 - 30	17,60		0,80	22,00	0,30	-21.751141°	-43.344051°
Biovaletas SUB4 - 31	8,00		0,80	10,00	0,30	-21.751314°	-43.344037°
Biovaletas SUB4 - 32	4,00		0,80	5,00	0,30	-21.751727°	-43.344331°
Biovaletas SUB4 - 33	7,20		0,80	9,00	0,30	-21.751807°	-43.344349°
Biovaletas SUB4 - 34	13,60		0,80	17,00	0,30	-21.752168°	-43.345324°
Biovaletas SUB4 - 35	11,20		0,80	14,00	0,30	-21.751970°	-43.345857°
Jardins de chuva SUB2 - 1	225,00	470,00	1,50		0,30	-21.734993°	-43.329253°
Jardins de chuva SUB2 - 2	28,00		1,50		0,30	-21.735437°	-43.330524°
Jardins de chuva SUB2 - 3	17,00		1,50		0,30	-21.735645°	-43.330737°
Jardins de chuva SUB2 - 4	12,00		1,50		0,30	-21.735829°	-43.330919°
Jardins de chuva SUB2 - 5	69,00		1,50		0,30	-21.739817°	-43.332412°
Jardins de chuva SUB2 - 6	119,00		1,50		0,30	-21.740019°	-43.332500°
Jardins de chuva SUB4 - 1	19,50	1483,00	1,50	13,00	0,30	-21.749064°	-43.340832°

Jardins de chuva SUB4 - 2	138,00		1,50		0,30	-21.741844°	-43.335448°
Jardins de chuva SUB4 - 3	127,00		1,50		0,30	-21.741988°	-43.335667°
Jardins de chuva SUB4 - 4	163,00		1,50		0,30	-21.742525°	-43.337087°
Jardins de chuva SUB4 - 5	87,00		1,50		0,30	-21.742889°	-43.338145°
Jardins de chuva SUB4 - 6	28,50		1,50	19,00	0,30	-21.742902°	-43.338443°
Jardins de chuva SUB4 - 7	74,00		1,50		0,30	-21.743304°	-43.338713°
Jardins de chuva SUB4 - 8	33,00		1,50		0,30	-21.744429°	-43.338225°
Jardins de chuva SUB4 - 9	285,00		1,50		0,30	-21.749843°	-43.342192°
Jardins de chuva SUB4 - 10	43,50		1,50	29,00	0,30	-21.751031°	-43.343958°
Jardins de chuva SUB4 - 11	6,00		1,50	4,00	0,30	-21.751877°	-43.344453°
Jardins de chuva SUB4 - 12	200,00		1,50		0,30	-21.752961°	-43.344718°
Jardins de chuva SUB4 - 13	19,50		1,50	13,00	0,30	-21.752922°	-43.345029°
Jardins de chuva SUB4 - 14	58,00		1,50		0,30	-21.752934°	-43.345161°
Jardins de chuva SUB4 - 15	60,00		1,50		0,30	-21.752883°	-43.345279°
Jardins de chuva SUB4 - 16	105,00		1,50		0,30	-21.752745°	-43.345646°

Jardins de chuva SUB4 - 17	36,00		1,50	24,00	0,30	-21.753461°	-43.345011°
----------------------------	-------	--	------	-------	------	-------------	-------------

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 - Áreas totais de implantação por solução e sub-bacia.

Sub-bacia	Bacias det. (m²)	Biovaletas (m²)	Jardins (m²)	Total (m²)
SUB1	6.756	—	—	6.756
SUB3	1.555	68	—	1.623
SUB2	12.273	287	470	13.030
SUB4	687	749	1.483	2.919
TOTAL	21.271	1.104	1.953	24.328

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 - Porcentagem da área impermeável tratada por sub-bacia.

Sub-bacia	% Bacias det.	% Biovaletas	% Jardins	% Total
SUB1	2,38%	—	—	2,38%
SUB3	0,29%	0,01%	—	0,30%
SUB2	0,87%	0,02%	0,03%	0,92%
SUB4	0,03%	0,03%	0,07%	0,13%

Fonte: Elaborado pela autora.

4.7.3. Parâmetros das SbN no SWMM

A representação das SbN no SWMM ocorreu da seguinte forma, as biovaletas foram modeladas no SWMM como *Vegetative Swale* e os jardins de chuva como *Rain Garden*, ambos inseridos como controles LID (*Low Impact Development*) associados às suas respectivas sub-bacias, com parâmetros adotados com base nos valores típicos disponibilizados no Manual do Usuário do SWMM 5.2 (ROSSMAN, 2022) apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros das LIDs inseridos no SWMM.

Parâmetro	Biovaleta	Jardim de Chuva
Altura da berma (mm)	300	300
Volume de vegetação	0,10	0,10
Manning n superfície	0,15	0,15
Declividade superficial (%)	2	1
Talude lateral (run/rise)	3	—
Espessura do solo (mm)	—	300
Porosidade do solo	—	0,50
Capacidade de campo	—	0,20
Ponto de murcha	—	0,10
Condutividade hidráulica (mm/h)	—	25
Taxa de percolação (mm/h)	0,50	0,50

Fonte: Manual SWMM 5.2 (ROSSMAN, 2022). Elaborado pela autora.

Já as bacias de retenção foram modeladas como *Storage Units*, conectadas às sub-bacias por condutos circulares de diâmetro adotado de 1,50 m, que representa o dispositivo de saída controlada da estrutura.

Os parâmetros de infiltração no fundo das bacias de retenção foram definidos pelo método de *Green-Ampt* e os dados utilizados foram: sucção de 11,26 pol, condutividade hidráulica de 0,020 pol/h e déficit de umidade inicial de 0,113. Tais valores foram adotados com base na Figura 17 do manual do SWMM (ROSSMAN; SIMON, 2022), considerando a predominância de solos argilosos na bacia, identificados a partir do shapefile pedológico do IBGE, adotou-se a classe textural Argila Franca para os Latossolos (Grupo B, 80%) e Franco Argiloso para os Cambissolos (Grupo C, 20%), resultando nos parâmetros ponderados.

Figura 17 - Características do solo.

Classe do Solo	K	ψ	ϕ	CC	WP
Areia	4,74	1,93	0,437	0,062	0,024
Areno Lemoso	1,18	2,40	0,437	0,105	0,047
Lemo Arenoso	0,43	4,33	0,453	0,190	0,085
Lemo	0,13	3,50	0,463	0,232	0,116
Lemo Franco	0,26	6,69	0,501	0,284	0,135
Lemo Arenoso Argiloso	0,06	8,66	0,398	0,244	0,136
Lemo Argiloso	0,04	8,27	0,464	0,310	0,187
Lemo Franco Argiloso	0,04	10,63	0,471	0,342	0,210
Argila Arenosa	0,02	9,45	0,430	0,321	0,221
Argila Franca	0,02	11,42	0,479	0,371	0,251
Argila	0,01	12,60	0,475	0,378	0,265

K = condutividade hidráulica do solo saturado, polegadas/hora

ψ = pressão de sucção, polegadas

ϕ = porosidade, fração

CC = capacidade de campo, fração

WP = ponto de murcha, fração

Fonte: Manual SWMM 5.2, p. 169.

4.7.4. Cenários de simulação

Para a avaliação da eficiência de cada solução individualmente e em combinação, foram definidos oito cenários de simulação (Tabela 12), e em cada cenário, os elementos não utilizados foram desativados sem remoção do modelo, mantendo a consistência da estrutura de simulação.

Tabela 12 - Cenários de simulação.

Cenário	Descrição
1	Sem Soluções Baseadas na Natureza — situação atual da bacia
2	Somente bacias de retenção
3	Somente jardins de chuva
4	Somente biovaletas
5	Bacias de retenção + jardins de chuva
6	Bacias de retenção + biovaletas
7	Jardins de chuva + biovaletas
8	Todas as soluções combinadas (bacias + jardins + biovaletas)

Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, os resultados de cada cenário foram avaliados com base na vazão máxima e na vazão média no exutório da bacia, bem como no volume total escoado, permitindo a comparação quantitativa da eficiência de cada solução e de suas combinações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização da precipitação do evento crítico

Na análise verificou-se que o período simulado, de 20 a 27 de fevereiro de 2026, registrou precipitação total acumulada de 296,48 mm na estação pluviométrica Linhares (313670233A), localizada dentro dos limites da bacia hidrográfica do Ribeirão Yung. Sendo que dentro desses oito dias o evento crítico ocorreu no dia 24 de fevereiro de 2026 que corresponde ao Dia 4 da simulação, no qual foram registrados os maiores picos de vazão em todos os nós e no exutório da bacia, com registro de 23,15 mm em apenas 10 minutos às 00:50h.

5.2. Análise sem soluções baseadas na natureza

5.2.1. Escoamento por sub-bacia

Os resultados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para o Cenário 1, sem a implantação de Soluções Baseadas na Natureza, representando a situação atual da bacia hidrográfica do Ribeirão Yung estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 1.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,30	51,74	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,69	237,90	67,65	0,941

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

Os resultados expostos evidenciam a forte relação entre o percentual de impermeabilização e o coeficiente de escoamento de cada sub-bacia. A SUB4,

com 79,94% de área impermeável, apresentou o maior coeficiente de escoamento (0,941), indicando que praticamente toda a precipitação é convertida em escoamento superficial, com apenas 17,69 mm infiltrados dos 296,48 mm precipitados. Em contraste, a SUB1, com apenas 6,14% de impermeabilização, apresentou o menor coeficiente (0,639) e a maior infiltração (88,07 mm), demonstrando a importância da cobertura vegetal na regulação do ciclo hidrológico.

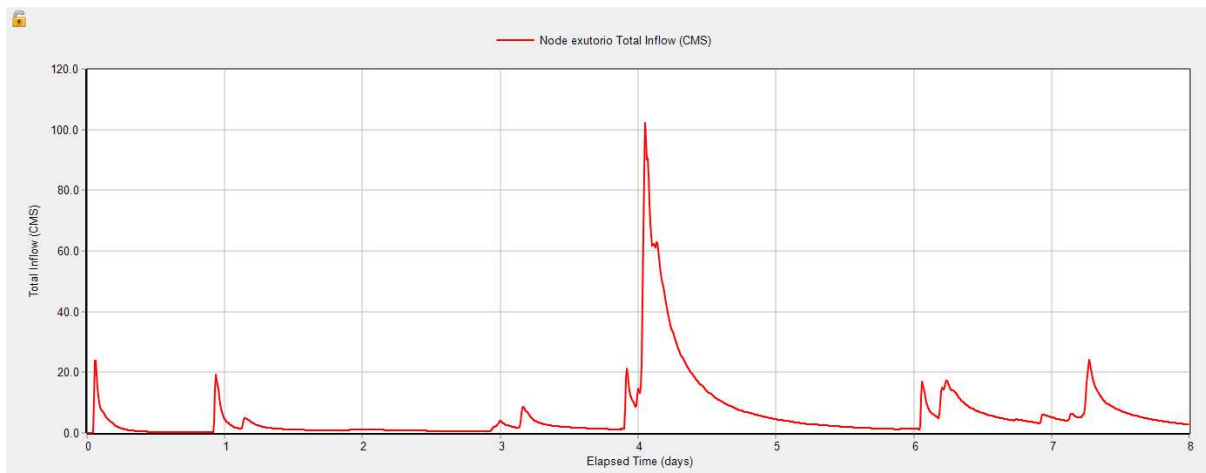
Outrossim, a SUB4 apresentou também o maior pico de vazão individual (67,65 m³/s), seguida pela SUB2 (51,74 m³/s), SUB3 (28,23 m³/s) e SUB1 (16,52 m³/s). Esses valores refletem tanto a área de cada sub-bacia quanto seu grau de impermeabilização, sendo a SUB4 o principal gerador de escoamento da bacia.

5.2.2. Vazões no exutório

A análise do hidrograma no exutório (Figura 18) revelou que a propagação do escoamento em cascata pelas quatro sub-bacias resultou em uma vazão máxima de 102,176 m³/s, isso no dia 24 de fevereiro às 01:10h, coincidindo dessa forma com o evento crítico de precipitação de 23,15 mm/10min registrado na estação Linhares. Outrossim, verificou-se um retorno rápido à vazão base após o evento, o que é característico de bacias com elevado percentual de impermeabilização.

Além disso, picos secundários foram observados nos demais dias que tiveram precipitação significativa (dias 20, 21, 23, 26 e 27 de fevereiro), porém com magnitudes consideravelmente menores que o evento principal. E ainda como observado na Figura 19 a vazão média no período foi de 9,830 m³/s e o volume total escoado foi de $4.113,915 \times 10^6$ litros.

Figura 18 - Hidrograma sem o uso de SBNs.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 14 - Vazão máxima e volume total.

Nó do Exutório	Frequência de Vazão (%)	Vazão Média (m³/s)	Vazão Máxima (m³/s)	Volume Total (10 ⁶ litros)
EXUTORIO	99,99	9,830	102,176	4113,915

Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

5.3. Resultados por cenário de simulação

Os resultados comparativos de todos os oito cenários de simulação, considerando a vazão máxima, a vazão média e o volume total no exutório da bacia, bem como as respectivas reduções percentuais em relação ao Cenário 1 (sem uso de soluções baseadas na natureza) estão apresentadas na Tabela 15.

Com base nos dados obtidos verificou-se que os cenários 2 (uso somente das bacias de retenção), 5 (uso conjunto das bacias de retenção e jardins de chuva) e 8 (uso conjunto das bacias de retenção, jardins de chuva e biovaleta) são os que mais se apresentaram eficientes com poucas diferenças. Já os cenários 3 (uso somente dos jardins de chuva), 4 (uso somente das biovaletas) e 7 (uso conjunto dos jardins de chuva e das biovaletas) apresentaram as menores atenuações da cheia, o que demonstra que a presença de bacias de retenção em bacias desse porte é fundamental para o amortecimento dos picos de vazão. Em seguida, cada cenário será analisado separadamente.

Tabela 15 - Resultados comparativos dos cenários de simulação no exutório.

Cenário	Vazão máxima (m³/s)	Redução máxima (%)	Vazão média (m³/s)	Redução média (%)	Volume (10 ⁶ L)	Redução do volume (%)
1 — Sem SBN	102,176	—	9,830	—	4.113,915	—
2 — Só bacias	68,453	33,01%	8,566	12,86%	3.978,184	3,30%
3 — Só jardins	102,098	0,08%	9,827	0,03%	4.113,044	0,02%
4 — Só biovaletas	102,312	≈0%	9,834	≈0%	4.115,114	≈0%
5 — Bacias + jardins	68,447	33,02%	8,565	12,87%	3.977,563	3,31%
6 — Bacias + biovaletas	68,474	32,99%	8,567	12,85%	3.978,950	3,27%
7 — Jardins + biovaletas	102,234	0,06%	9,831	0,01%	4.114,243	0,04%
8 — Todas juntas	68,468	33,00%	8,565	12,87%	3.978,325	3,30%

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

5.4. Análise de cada cenário

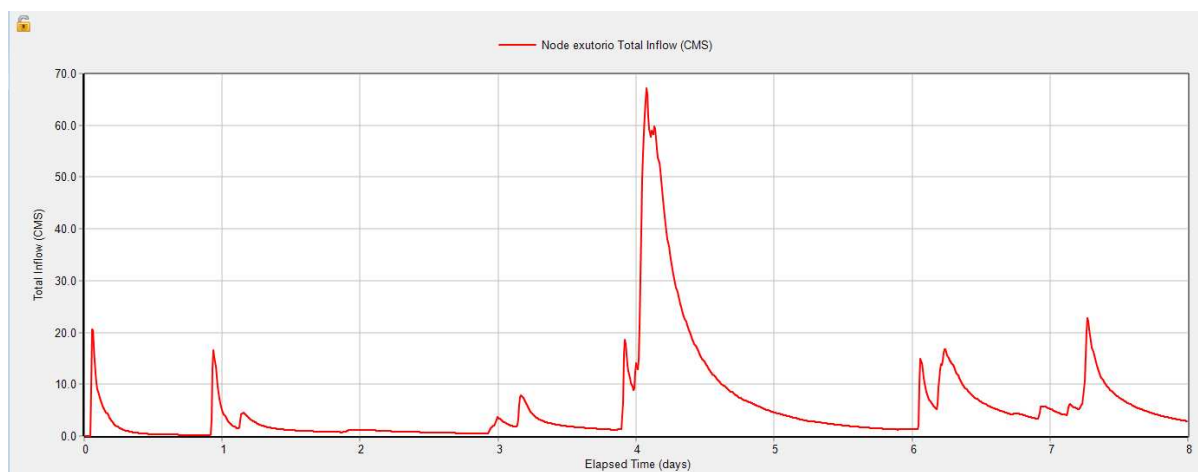
5.4.1. Bacias de retenção - Cenário 2

O Cenário 2, com a implantação exclusiva das bacias de retenção, foi responsável pela maior redução na vazão máxima do exutório entre todos os cenários que se utiliza somente uma técnica de compensação, com redução de 33,01% (de 102,176 para 68,453 m³/s). Sendo que a vazão média reduziu 12,86% e o volume total 3,30%.

Esse resultado demonstra que nas condições simuladas, as bacias de retenção são o elemento mais eficaz para o amortecimento de picos de vazão na bacia do Ribeirão Yung. Sendo que, o mecanismo de funcionamento delas consiste no armazenamento temporário do escoamento gerado nas sub-bacias, retardando sua chegada ao exutório e reduzindo o pico do hidrograma (Figura 20).

Também é importante destacar que as bacias dimensionadas não possuem capacidade de armazenar todo o volume do evento crítico, porém promovem amortecimento temporal expressivo dos picos de vazão. Os dados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 15.

Figura 19 - Hidrograma com o uso só de bacias de retenção.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 16 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 2.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,30	51,74	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,69	237,90	67,65	0,941

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

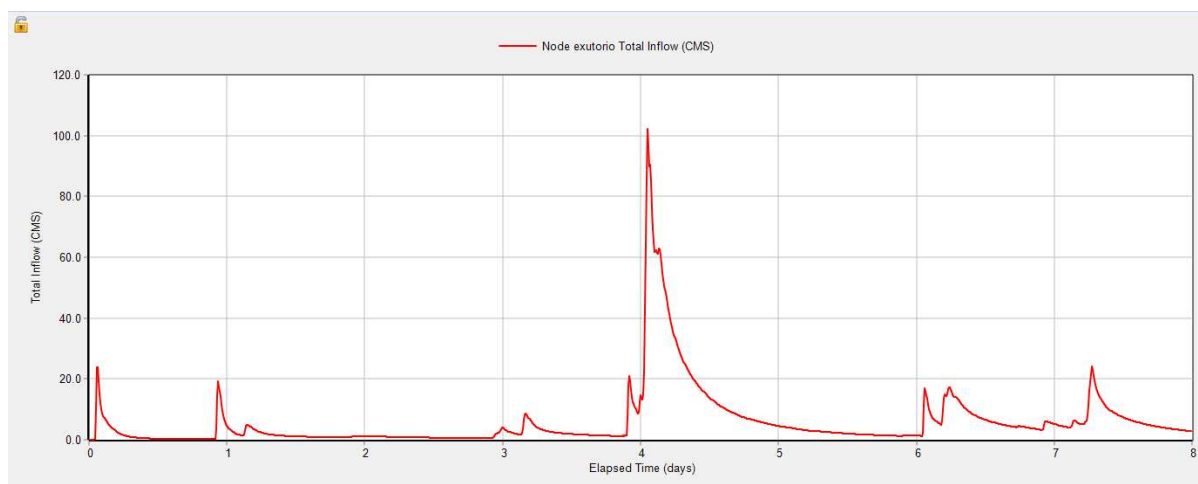
5.4.2. Jardins de chuva - Cenário 3

No Cenário 3, com hidrograma apresentado na Figura 21, observou-se que a implantação exclusiva dos jardins de chuva, resultou em redução de apenas 0,08% na vazão máxima do exutório (de 102,176 para 102,098 m³/s), o que representa uma variação sem efeito significativo para o evento simulado. Ademais, a redução no pico da SUB4, onde os jardins de chuva foram implantados com maior concentração, foi de 0,09% (de 67,65 para 67,59 m³/s), isso fazendo um comparativo com o cenário 1 (Tabelas 13 e 16).

Por fim, o pequeno impacto dos jardins de chuva pode ser explicado pela combinação de dois fatores, primeiro a área tratada representa menos de 0,10% da área impermeável total das sub-bacias onde foram implantados, e o segundo fato é que o evento simulado foi de alta magnitude (296,48 mm acumulados), com intensidade de pico (23,15 mm/10min) muito superior à capacidade de absorção das estruturas dimensionadas. Portanto, em eventos de

menor magnitude e com maior área de cobertura, o impacto dos jardins de chuva tenderia a ser mais expressivo.

Figura 20 - Hidrograma com o uso só de jardins de chuva.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 17 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 3.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	140,97	51,73	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,73	278,84	67,59	0,940

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

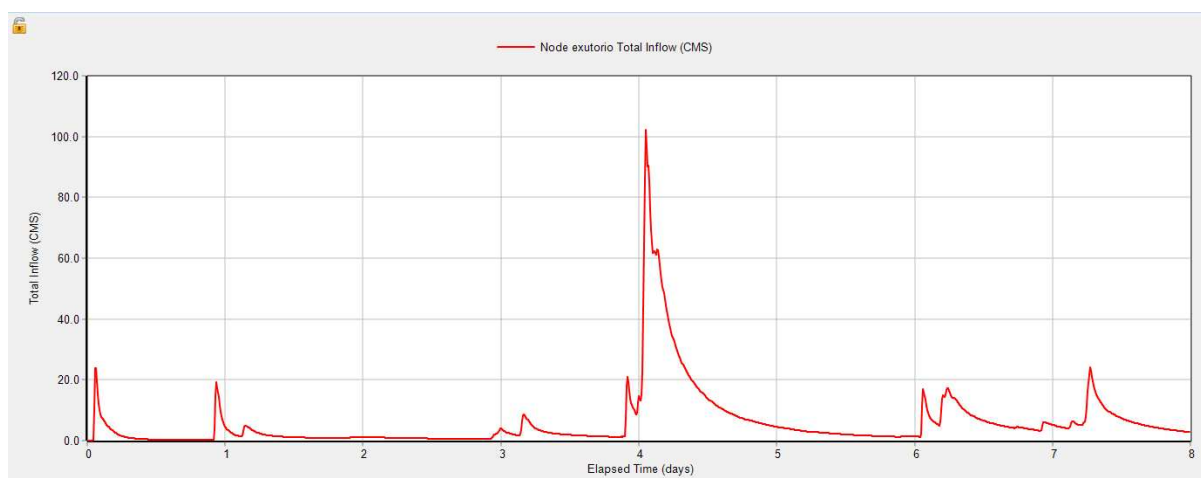
5.4.3. Biovaletas - Cenário 4

No Cenário 4, com a implantação exclusiva das biovaletas, houve variação de vazão máxima inferior a 0,2% em relação ao Cenário 1, dentro da margem de erro numérica do modelo SWMM. Esse resultado indica que as biovaletas, nas dimensões e quantidades implantadas, não produziram efeito significativo na redução dos picos de vazão para o evento simulado, já que como os jardins de chuva, elas cobrem uma fração muito pequena da área impermeável total da bacia (menos de 0,04% em cada sub-bacia), o que limita sua capacidade de influenciar o comportamento hidrológico global para eventos extremos.

Conclui-se que as biovaletas que são estruturas lineares de pequeno porte com função principal de condução e infiltração gradual do escoamento, são mais eficazes em eventos de menor intensidade e em bacias com maior densidade de implantação. Ademais, os resultados do escoamento superficial gerado em

cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 17 e o hidrograma gerado na Figura 22.

Figura 21 - Hidrograma com o uso só de biovaletas.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 18 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 4.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,33	51,73	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,69	237,84	67,63	0,943

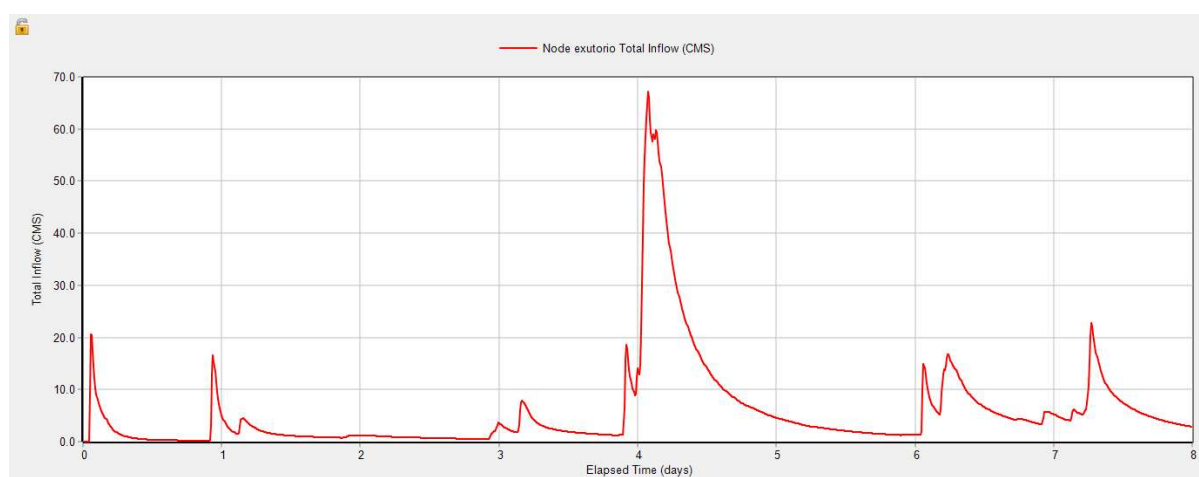
Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

5.4.4. Bacias de retenção + Jardins de chuva - Cenário 5

O Cenário 5 é o que apresentou a maior eficiência entre todos os cenários simulados, com vazão máxima de 68,447 m³/s (redução de 33,02%) e menor volume total de 3.977,563 × 10⁶ litros (redução de 3,31%). Portanto, observa-se que a combinação das bacias de retenção com os jardins de chuva resulta em uma ligeira melhora em relação ao uso exclusivo das bacias (Cenário 2), o que demonstra que os jardins de chuva contribuem marginalmente para a redução do volume escoado, ainda que seu efeito sobre o pico máximo seja praticamente nulo quando comparado isoladamente.

Ademais, os resultados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 18 e o hidrograma gerado na Figura 23.

Figura 22 - Hidrograma com o uso de bacias de retenção e jardins de chuva.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 19 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 5.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	140,97	51,73	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,73	237,78	67,59	0,940

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

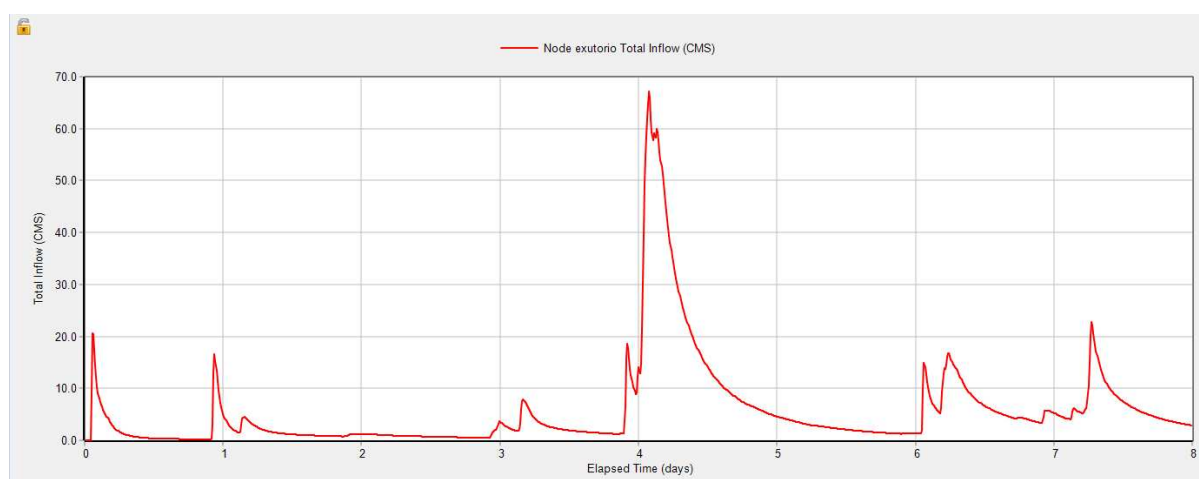
5.4.5. Bacias de retenção + Biovaletas - Cenário 6

Já no Cenário 6 se obteve resultados muito similares ao Cenário 2 (só bacias), apresentando vazão máxima de 68,474 m³/s (redução de 32,99%) e vazão média de 8,567 m³/s (redução de 12,85%).

Conclui-se que a adição das biovaletas às bacias de retenção não trouxe ganho significativo em relação ao uso isolado das bacias, o que confirma a baixa eficiência das biovaletas para o evento simulado.

Ademais, os resultados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 19 e o hidrograma gerado na Figura 24.

Figura 23 - Hidrograma com o uso de bacias de retenção e biovaletas.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 20 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 6.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,33	51,73	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,69	237,84	67,63	0,943

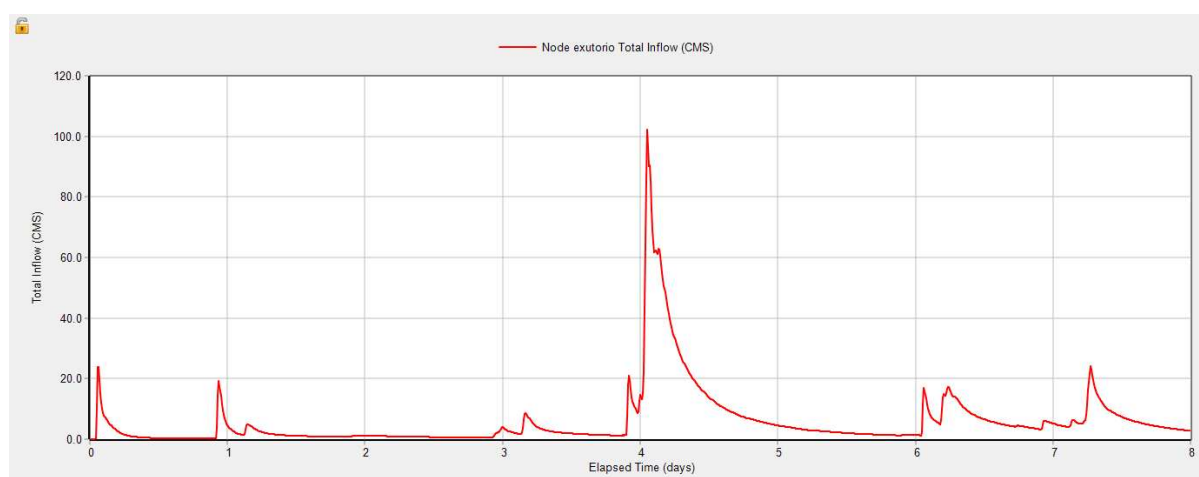
Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

5.4.6. Jardins de chuva + Biovaletas - Cenário 7

No Cenário 7, houve uma redução de apenas 0,06% na vazão máxima, confirmando que a combinação de jardins de chuva e biovaletas, sem estruturas de retenção, é insuficiente para promover redução significativa nos picos de vazão para o evento simulado. Com isso, esse resultado reforça a importância das bacias de retenção como elemento estruturante do sistema de drenagem proposto.

Ademais, os resultados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 20 e o hidrograma gerado na Figura 25.

Figura 24 - Hidrograma com o uso de jardins de chuva e biovaletas.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 21 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 7.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,30	51,72	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,73	237,71	67,56	0,942

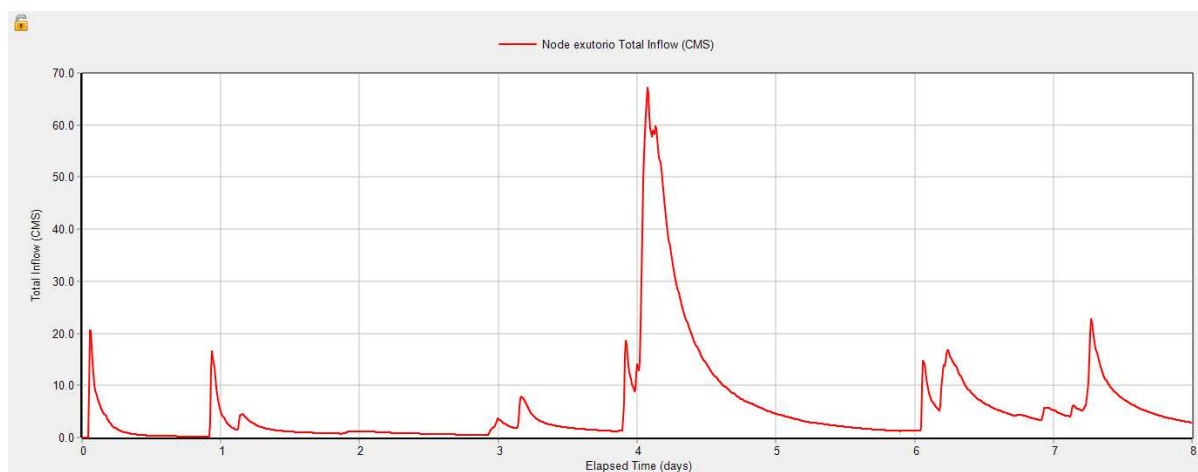
Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

5.4.7. Todas as soluções combinadas - Cenário 8

Por fim, o Cenário 8 onde são utilizadas todas as soluções implantadas simultaneamente, apresentou um resultado muito próximo ao Cenário 2 (só bacias) e ao Cenário 5 (bacias + jardins), com vazão máxima de 68,468 m³/s (redução de 33,00%). Isso demonstra que, para a escala e o evento simulados, a contribuição adicional das biovaletas ao conjunto já formado pelas bacias e jardins de chuva é praticamente insignificante.

Ademais, os resultados do escoamento superficial gerado em cada sub-bacia para esse cenário, estão apresentados na Tabela 21 e o hidrograma gerado na Figura 26.

Figura 25 - Hidrograma com o uso das três técnicas compensatórias.



Fonte: Elaborado pela autora. Dado do SWMM

Tabela 22 - Escoamento superficial por sub-bacia - Cenário 8.

Sub-bacia	Precipitação (mm)	Infiltração (mm)	Escoamento (mm)	Vazão de Pico (m³/s)	Coefficiente Escoamento
SUB1	296,48	88,07	189,33	16,52	0,639
SUB2	296,48	70,45	215,30	51,74	0,726
SUB3	296,48	83,39	195,63	28,23	0,660
SUB4	296,48	17,69	237,90	67,56	0,941

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

5.5. Comparação geral

Em suma, a análise comparativa dos oito cenários evidencia que as bacias de retenção são o elemento determinante na redução dos picos de vazão na bacia hidrográfica do Ribeirão Yung para o evento simulado. Visto que, nos quatro cenários que incluem bacias de retenção (Cenários 2, 5, 6 e 8), a vazão máxima reduziu aproximadamente 33% em todos os casos, independentemente da presença ou ausência de jardins de chuva e biovaletas. Já nos cenários sem bacias (Cenários 3, 4 e 7), a redução foi inferior a 0,10%, dentro da margem de variação numérica do modelo. Na tabela 22 é apresentado um resumo dos resultados das reduções obtidas.

Sob esse viés, o resultado apresentado é coerente com as características da bacia estudada, dado que o relevo de Juiz de Fora é predominantemente acidentado, com declividades entre 20 e 45% na maior parte

da bacia hidrográfica, o que limita significativamente a disponibilidade de áreas planas para implantação de soluções de infiltração em grande escala.

Outrossim, é que a maioria das ruas presentes na bacia estudada são relativamente estreitas, tal fato acaba restringindo os pontos de implementação de biovaletas e jardins de chuva e consequentemente, suas áreas de influência. Dado isso, com menos de 0,10% da área impermeável tratada por essas soluções, o impacto sobre o hidrograma de uma precipitação extrema como a simulada (296,48 mm em 8 dias, com pico de 23,15 mm/10min) é necessariamente pequeno.

Em contrapartida, as bacias de retenção, atuam pelo princípio do armazenamento temporário e da laminação do hidrograma, sendo sua eficiência menos dependente da intensidade da precipitação e mais relacionada ao volume armazenado e ao retardo do escoamento. Ainda assim, mesmo com a capacidade de armazenamento inferior ao volume do evento crítico (Tabela 23), as bacias promoveram redução de 33% na vazão máxima do exutório, apresentando um resultado expressivo considerando que cobrem menos de 1% da área total da bacia. Além disso, observou-se que as sub-bacias 1 e 3 apresentaram valores idênticos de infiltração, escoamento e coeficiente de escoamento em todos os cenários analisados, indicando que as bacias de retenção implantadas nessas áreas não interferiram no volume gerado nas sub-bacias, mas sim no comportamento temporal do escoamento.

Em síntese, os resultados obtidos indicam que, para bacias mistas com relevo acidentado como a do Ribeirão Yung, as bacias de retenção representam a solução baseada na natureza com maior potencial de impacto hidrológico. Já, os jardins de chuva e as biovaletas são complementares e contribuem marginalmente para a redução do volume escoado, sendo mais eficazes em eventos de menor intensidade ou quando implantados em maior escala. Por fim, a combinação de bacias de retenção com jardins de chuva (Cenário 5) apresentou os melhores resultados globais, sugerindo que essa combinação é a mais indicada para a bacia estudada.

Tabela 23 - Resumo das reduções por cenário.

Cenários	Redução da Vazão Máxima (%)	Redução da Vazão Média (%)	Redução do Volume (%)
1 — Sem SBN	—	—	—
2 — Só bacias	33,01%	12,86%	3,30%
3 — Só jardins	0,08%	0,03%	0,02%
4 — Só biovaletas	≈0%	≈0%	≈0%
5 — Bacias + jardins	33,02%	12,87%	3,31%
6 — Bacias + biovaletas	32,99%	12,85%	3,27%
7 — Jardins + biovaletas	0,06%	0,01%	0,04%
8 — Todas juntas	33,00%	12,87%	3,30%

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2.

Tabela 24 - Comparação entre capacidade de armazenamento das bacias de retenção e volume escoado por sub-bacia.

Sub-bacia	Área (m²)	Profundidade (m)	Capacidade (m³)	Volume escoado (m³)	Relação volume/capacidade
ST_SUB1	6.756	1,50	10.134	875.000	86x
ST_SUB3	1.555	1,50	2.333	1.270.000	544x
ST_SUB2	12.273	1,50	18.410	1.221.000	66x
ST_SUB4	687	1,50	1.031	777.000	754x
TOTAL	21.271	—	31.908	4.143.000	130x

Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SWMM 5.2. Capacidade = Área × Profundidade. Volume escoado = total do período simulado (20 a 27/02/2026).

5.6. Limitações do estudo

Este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, a rede de drenagem extraída do MDE apresenta padrão matricial característico de dados de resolução de 30 metros, sendo assim, a utilização de um MDE de maior resolução por exemplo a de 1 metro poderia aprimorar a precisão dos parâmetros morfométricos.

Em segundo lugar, as dimensões das soluções baseadas na natureza escolhidas, foram padronizadas e não individualmente dimensionadas, o que pode resultar em superestimação ou subestimação da eficiência de cada estrutura. Dado isso, o dimensionamento detalhado de cada unidade,

considerando critérios hidrológicos específicos como tempo de retorno e volume de armazenamento necessário, permitiria otimizar a eficiência das intervenções.

Em terceiro lugar, a ausência de dados de vazão medidos em campo do Ribeirão Yung impossibilitou a calibração e validação do modelo, etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados em estudos hidrológicos, pois a calibração do modelo com dados observados permitiria ajustar os parâmetros de infiltração, *Manning* e CN para melhor representar o comportamento real da bacia.

Em quarto lugar, o valor adotado de dois dias secos antecedentes constitui uma simplificação da condição real, uma vez que foram registradas precipitações de baixa intensidade nos dias que antecederam o período analisado. Uma alternativa para representar de forma mais fiel as condições de umidade do solo seria ampliar o período de simulação, iniciando em 18 de fevereiro.

Por fim, a simulação foi realizada para um único evento de precipitação sendo que a análise para múltiplos eventos com diferentes tempos de retorno, incluindo eventos de menor magnitude mais frequentes, forneceria uma visão mais abrangente da eficiência das soluções propostas ao longo do tempo.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou o sistema de macrodrenagem da bacia hidrográfica do Ribeirão Yung, em Juiz de Fora, Minas Gerais, por meio de modelagem hidrológico-hidráulica no *software* SWMM 5.2, com o objetivo de avaliar a eficiência de três Soluções Baseadas na Natureza, sendo elas bacias de retenção, jardins de chuva e biovaletas, na redução dos picos de escoamento superficial. Para isso, a análise foi realizada para um evento de precipitação intensa de oito dias, registrado em fevereiro de 2026 pela estação pluviométrica Linhares, com precipitação total acumulada de 296,48 mm e pico de 23,15 mm em 10 minutos, correspondente ao maior valor pontual do período simulado.

Ademais, os resultados obtidos com os oito cenários de simulação permitiram identificar de forma clara o papel de cada solução no comportamento hidrológico da bacia. As bacias de retenção se destacaram como sendo o elemento mais eficiente entre as soluções avaliadas, promovendo redução de aproximadamente 33% na vazão máxima do exutório em todos os cenários em que foram implantadas, individualmente (Cenário 2), combinadas com jardins de chuva (Cenário 5), com biovaletas (Cenário 6) e com todas as soluções juntas (Cenário 8). Além disso, a vazão máxima no exutório reduziu de 102,176 m³/s no Cenário 1 para 68,453 m³/s no Cenário 2, resultado expressivo considerando que as estruturas cobrem menos de 1% da área total da bacia.

Outrossim, os jardins de chuva e as biovaletas, quando aplicados isoladamente ou combinados entre si, apresentaram variações na vazão máxima inferiores a 0,10%, dentro da margem de erro numérico do modelo, sendo considerados sem efeito significativo para o evento simulado. Esse resultado é explicado pela pequena fração da área impermeável tratada por essas soluções, menos de 0,10% em cada sub-bacia e pela alta magnitude do evento simulado, que supera significativamente a capacidade de absorção das estruturas dimensionadas. Tais soluções são mais indicadas para eventos de menor intensidade ou quando implantadas em maior escala e com maior cobertura da área impermeável.

Foi visto que o cenário com melhor desempenho global foi o 5, que apresenta a combinação de bacias de retenção e jardins de chuva, pois obteve a

maior redução percentual na vazão máxima (33,02%) e o menor volume total escoado ($3.977,563 \times 10^6$ litros, redução de 3,31%). A adição das biovaletas a esse conjunto não trouxe ganho significativo adicional, indicando que a combinação bacias de retenção + jardins de chuva é a mais indicada para a bacia estudada nas condições avaliadas.

Analisando as características geomorfológicas da bacia do Ribeirão Yung que possui relevo predominantemente acidentado com declividades entre 20 e 45%, ruas relativamente estreitas e curso d'água parcialmente canalizado na porção urbana, verificou-se que estes aspectos limitaram a disponibilidade de áreas adequadas para implantação de jardins de chuva e biovaletas em maior escala, restringindo o impacto dessas soluções. Já as bacias de retenção, por sua vez, demonstraram maior adaptabilidade ao contexto local, sendo implantadas em áreas de menor declividade identificadas próximas ao curso d'água nas sub-bacias mais rurais.

Como limitações do estudo, destacam-se: a ausência de calibração e validação do modelo por falta de dados de vazão medidos em campo no Ribeirão Yung; a utilização de dados de precipitação de uma única estação pluviométrica, sem aplicação de métodos de interpolação espacial; o dimensionamento padronizado das SBN sem projeto individualizado de cada estrutura; a simplificação na adoção de dois dias secos antecedentes ao início da simulação sendo houve poucas precipitações nos dias 18 e 19 de fevereiro; e a análise restrita a um único evento de precipitação. Nesse sentido, estudos futuros podem ampliar a presente análise a partir da calibração do modelo com dados observados, da simulação de eventos associados a diferentes tempos de retorno, do dimensionamento otimizado das estruturas e da avaliação econômica comparativa das soluções propostas.

Conclui-se, portanto, que as Soluções Baseadas na Natureza, especialmente as bacias de retenção, representam alternativas viáveis e eficientes para a mitigação dos picos de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Yung. Além disso, os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos relevantes para o planejamento de intervenções de drenagem sustentável em Juiz de Fora, alinhando-se às diretrizes do Plano de Saneamento Básico municipal e às políticas nacionais de desenvolvimento urbano sustentável, e demonstrando que mesmo em bacias mistas com relevo acidentado, as SBN podem promover

reduções expressivas nos picos de vazão quando adequadamente dimensionadas e localizadas.

Como considerações finais cabe destacar que os resultados deste estudo mostraram que o software SWMM pode ser utilizado não apenas em estudos de microdrenagem, mas também em análises de macrodrenagem urbana.

Ademais, a partir dos resultados obtidos, alguns aspectos podem ser explorados em trabalhos futuros. Uma das possibilidades é realizar uma análise econômico-financeira comparando as soluções baseadas na natureza estudadas, com soluções convencionais de drenagem, como galerias pluviais e canalizações. Essa comparação pode considerar não apenas os custos de implantação, operação e manutenção, mas também os benefícios ambientais, sociais e econômicos proporcionados pelas SBN, como por exemplo a valorização dos espaços urbanos. Outra sugestão é avaliar outras soluções baseadas na natureza que não fizeram parte deste estudo, como trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, telhados verdes e parques lineares, ampliando as alternativas de manejo das águas pluviais para a bacia estudada. Além disso, a utilização de dados hidrológicos e hidráulicos obtidos em campo permitiria calibrar e validar o modelo com maior precisão, reduzindo as incertezas relacionadas aos parâmetros adotados com base na literatura. Também seria interessante analisar o desempenho das soluções propostas para diferentes períodos de retorno das chuvas e em cenários de mudanças climáticas, verificando sua eficiência diante de eventos extremos. Por fim, recomenda-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho seja aplicada em outras bacias hidrográficas de Juiz de Fora e de outros municípios, contribuindo para o planejamento da drenagem urbana e incentivando a adoção de soluções mais sustentáveis para o manejo das águas pluviais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Paulo Roberto Martins de; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; GOLDENFUM, Joel Avruch. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21–29, jul./set. 2000. ISSN 2318-0331. Disponível em: <https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=643>. Acesso em: 31 maio 2026.

CAMPOS, V. N. O. **Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluidas em ambientes rígidos**. Revista LABVERDE, São Paulo, v. 11, n. 1, e189314, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189314>. Acesso em: 26 abr. 2026.

CNN BRASIL. **Calamidade pública e mortes: veja o que explica caos em Juiz de Fora (MG)**. CNN Brasil, 24 fev. 2026. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sudeste/mg/calamidade-publica-e-mortes-veja-o-que-explica-caos-em-juiz-de-fora-mg/>. Acesso em: 28 maio 2026.

CONCRETE SHOW DIGITAL. **A tecnologia por trás do pavimento permeável**. Concrete Show Digital, [S.l.], 24 ago. 2022. Disponível em: <https://digital.concreteshow.com.br/produtos/tecnologia-por-trs-do-pavimento-permeavel/>. Acesso em: 31 maio 2026.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. **Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade**. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2007.

GUTIERREZ, A. I. R.; RAMOS, I. C. **Guia de Técnicas Sustentáveis em Drenagem Urbana**. Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Pós-Graduação em Gestão da Drenagem Urbana, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Juiz de Fora (MG)**. 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>. Acesso em: 28 maio 2026.

LIMA NETO, Vicente de Sousa; TAVARES, Paulo Roberto Lacerda; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. **Análise da implantação de reservatórios de detenção em lotes urbanos**. Revista de Geociências do Nordeste, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 222–237, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34911. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/34911>. Acesso em: 31 maio 2026.

MELO, T. A. T. *et al.* **Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147–165, out./dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400011>. Acesso em: 25 abr. 2026.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar? *Texto para Discussão* n. 2791. Rio de Janeiro: Ipea, ago. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2791>. Acesso em: 30 mai. 2026

MOTA, Guilherme Assis. **Reservatórios de detenção**. Soluções para Cidades, [S.l.], 27 ago. 2013. Atualizado em: 24 ago. 2020. Disponível em: <https://www.solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>. Acesso em: 31 maio 2026.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Lago do Parque da Lajinha funcionará como bacia de detenção de águas pluviais**. Juiz de Fora: Portal PJF, 3 nov. 2023. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=81832>. Acesso em: 22 jun. 2026.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **PAC Santa Luzia: Margarida Salomão assina contrato para obras de macrodrenagem em Santa Luzia e região.** Juiz de Fora: Portal PJF, 24 abr. 2026. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=88842>. Acesso em: 22 jun. 2026.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Prefeitura realiza mais de mil metros de obras em redes de drenagem no primeiro semestre de 2025.** Juiz de Fora: Portal PJF, 22 jul. 2025. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=86803>. Acesso em: 22 jun. 2026.

RODRIGUEZ, Carlos Andrés Martínez; TEIXEIRA, Bernardo Arantes do Nascimento. **Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, jan./fev. 2021. DOI: 10.1590/s1413-415220190034. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/5LdxspnHC88QmzRzRRhcd6w/>. Acesso em: 31 maio 2026.

ROSSMAN, L. A.; SIMON, M. A. **Storm Water Management Model — User's Manual Version 5.2.** EPA/600/R-22/030. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development, fev. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2026.

SILVA, L. H. *et al.* **Sistemas de biorretenção para o manejo das águas pluviais: panorama internacional e critérios para projeto.** Research, Society and Development, v. 9, n. 11, e69591110335, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10335>. Acesso em: 19 abr. 2026.

SILVEIRA, Danyella. **Biovaletas como alternativa sustentável para o escoamento de águas pluviais.** InQ.Acadêmica — Portal de Inovação e Qualidade do IFBA, Vitória da Conquista, 5 fev. 2024. Disponível em:

<https://inq.conquista.ifba.edu.br/v1/biovaletas-como-alternativa-sustentavel-para-o-e-scoamento-de-aguas-pluviais/>. Acesso em: 25 abr. 2026.

SILVEIRA, G. B.; RODRIGUES, L. H. R.; DORNELLES, F. **Uso de Soluções baseadas na Natureza (SbN) pela Gestão Pública Brasileira no Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 17, e20240012, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/54jTFvySqRCgzkwZ44bJj6M/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 25 abr. 2026

TASSI, R. *et al.* **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139–154, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SLTzVMTPCbKMQxxTb37FzCr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 abr. 2026.

TRIBUNA DE MINAS. **Entenda as causas das chuvas intensas e os impactos da ocupação urbana em Juiz de Fora**. Tribuna de Minas, dez. 2025. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/especiais/biosfera/19-12-2025/entenda-chuvas-jf.html>. Acesso em: 28 maio 2026.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 36–37, out./dez. 2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020. Acesso em: 23 abr. 2026.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília: CEPAL: IPEA, 2012. 50 p. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48).

UFJF – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **O mês que entrou para a história de Juiz de Fora**. Notícias UFJF, Juiz de Fora, 27 fev. 2026. Disponível em:

<https://www2.ufjf.br/noticias/2026/02/27/o-mes-que-entrou-para-a-historia-de-juiz-de-fora/>. Acesso em: 28 mai 2026.