



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO
CÓRREGO DO LEITÃO EM EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO**

Luciana Emanuelle Sales Magalhães

Belo Horizonte

2025

Luciana Emanuelle Sales Magalhães

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO
CÓRREGO DO LEITÃO EM EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Keizo Odan

Belo Horizonte

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL - NS



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 7 / 2025 - DCTA (11.55.03)

Nº do Protocolo: 23062.038690/2025-15

Belo Horizonte-MG, 21 de julho de 2025.

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC

Luciana Emanuelle Sales Magalhães

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO LEITÃO EM EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 18 de julho de 2025

Banca examinadora:

Presidente da Banca Examinadora

Prof. DSc. Frederico Keizo Odan – CEFET-MG – Orientador

1º Examinador

Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha – CEFET-MG

2ª Examinadora

Profa. DSc. Luciana Peixoto Amaral – CEFET-MG

(Assinado digitalmente em 22/07/2025 13:45)

ANDRE LUIZ MARQUES ROCHA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 2143906

(Assinado digitalmente em 22/07/2025 18:13)

FREDERICO KEIZO ODAN
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 2092847

(Assinado digitalmente em 22/07/2025 17:11)

LUCIANA PEIXOTO AMARAL
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 1808233

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **7**, ano: **2025**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:
21/07/2025 e o código de verificação: **7831121a79**

AGRADECIMENTOS

É com imensa alegria que concluo mais uma etapa decisiva da minha trajetória acadêmica. Registro minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para transformar um percurso desafiador em uma experiência inestimável.

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Professor Frederico Odan, pelo acompanhamento atento, pelas orientações técnicas e pelo incentivo constante ao longo de todo o trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos demais professores do DCTA pelos ensinamentos valiosos ao longo de todo o meu curso, em especial, aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e pelas contribuições prestadas a este trabalho.

Ao CEFET-MG, instituição que acolheu minha formação, proporcionando vivências acadêmicas e pessoais essenciais para meu crescimento profissional e pessoal.

A minha família, de sangue e de coração, agradeço pela paciência, pelo carinho e pela compreensão em períodos de ausência.

Aos todos os amigos queridos, que compartilharam dúvidas, descobertas e celebrações e à Isabela, cuja parceria acompanhou as diversas etapas da graduação e seguirá pela vida, expresso minha profunda gratidão.

Ao meu companheiro, pelo suporte e pela motivação contínuos.

À Prefeitura de Belo Horizonte, pela disponibilização dos dados que tornaram viável a análise aqui desenvolvida.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso e pela minha formação, deixo meu reconhecimento e sincero agradecimento.

RESUMO

MAGALHÃES, Luciana Emanuelle Sales. Avaliação do comportamento da sub-bacia hidrográfica do Córrego do Leitão em eventos extremos de precipitação. 2025. 125 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Eventos climáticos extremos têm surgido como uma das expressões mais evidentes das mudanças climáticas, que geraram custos diretos de aproximadamente R\$ 3,5 milhões apenas entre 2016 e 2018, exigindo procedimentos analíticos que quantifiquem magnitude e frequência. Nesta investigação, avaliou-se a suscetibilidade a inundações da sub-bacia do córrego Leitão, setor densamente urbanizado de Belo Horizonte (MG), por meio de uma abordagem que integrou análise espaço-temporal de chuva extrema e modelagem hidrológica. A etapa de detecção de tendências baseou-se nos doze índices recomendados pelo *Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDM), calculados a partir de séries diárias de duas estações pluviométricas em Belo Horizonte. Para caracterizar o limiar de chuva severa, cruzaram-se registros de alagamentos históricos com os totais diários correspondentes, o que permitiu estabelecer um valor de referência a partir do qual se analisou a evolução anual dos extremos. Os resultados permaneceram inconclusivos, pois a análise se baseou em apenas duas estações pluviométricas, quantidade insuficiente para representar de maneira adequada a variabilidade regional. Na modelagem, adotou-se o *Storm Water Management Model* (SWMM 5.2.4), ferramenta amplamente aplicada em avaliação de drenagem urbana. A rede foi discretizada, em ambiente QGIS 3.34.11, em quinze sub-bacias hidrologicamente homogêneas. Os parâmetros de rugosidade, largura característica e percentual de área impermeável foram transferidos do estudo calibrado de Rosa (2017), enquanto os valores médios de *Curve Number* foram atualizados conforme a metodologia publicada pela Prefeitura de Belo Horizonte em 2022, em resposta à nova Lei de Uso e Ocupação do Solo. O método de infiltração *Soil Conservation Service* (SCS) foi selecionado por demandar apenas um parâmetro e por já ter demonstrado bom desempenho em cenários urbanos brasileiros. Chuvas de projeto, derivadas das equações IDF ajustadas, foram simuladas para períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos, com durações críticas de 30 min e 45 min. As saídas mostraram picos de valores de vazão próximos 75 e 83 m³ s⁻¹ para os tempos de retornos, que apontam vulnerabilidade do sistema de macrodrenagem local. A validação com eventos observados em 2017 na estação da PBH e 2020 na estação do INMET confirmou a coerência temporal dos picos simulados, embora tenha

evidenciado subestimações pontuais, atribuídas à ausência de medições diretas de vazão e à simplificação de canais subterrâneos. Em síntese, a pesquisa demonstra que a bacia do córrego Leitão opera próxima ao seu limite hidráulico em eventos extremos e apresenta vulnerabilidade a precipitações curtas e intensas, ressaltando a necessidade de monitoramento pluviométrico.

Palavras-chave: Inundação urbanas. Córrego Leitão. Precipitações extremas. Mudanças Climáticas. SWMM.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Luciana Emanuelle Sales. Evaluation of the Behavior of the Leitão Stream Sub-Basin during Extreme Precipitation Events. 2025. 125 f. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Extreme weather events have emerged as one of the clearest expressions of climate change, generating direct costs of approximately BRL 3.5 million between 2016 and 2018 alone and requiring analytical procedures that quantify both magnitude and frequency. This investigation assessed the flood susceptibility of the Leitão Creek sub-basin, a densely urbanised sector of Belo Horizonte (MG), through an approach that combined spatio-temporal analysis of extreme rainfall with hydrological modelling. Trend detection relied on the twelve indices recommended by the Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDM), calculated from daily series recorded at two rain-gauge stations in Belo Horizonte. To define the severe-rainfall threshold, historical flood records were cross-referenced with the corresponding daily totals, enabling establishment of a reference value from which the annual evolution of extremes was analysed. Results remained inconclusive, as the analysis was based on only two gauges—insufficient to represent regional variability adequately.

For modelling, the Storm Water Management Model (SWMM 5.2.4), widely used in urban-drainage assessments, was adopted. The drainage network was discretised in QGIS 3.34.11 into fifteen hydrologically homogeneous sub-basins. Roughness, characteristic width, and percentage of impervious area parameters were transferred from the calibrated study by Rosa (2017), while average Curve Numbers were updated following the methodology published by the Belo Horizonte City Council in 2022 in response to the new Land-Use and Occupation Law. The Soil Conservation Service (SCS) infiltration method was selected because it requires only one parameter and has shown good performance in Brazilian urban contexts. Design storms derived from adjusted IDF equations were simulated for return periods of 2, 10, and 100 years, with critical durations of 30 min and 45 min. Outputs showed peak discharges close to 75 and 83 m³ s⁻¹ for these return periods, indicating vulnerability in the local macro-drainage system. Validation against events observed in 2017 (PBH station) and 2020 (INMET station) confirmed the temporal coherence of simulated peaks, although it revealed occasional underestimations attributed to the absence of direct flow measurements and simplifications of underground channels. In summary, the study demonstrates that the

Leitão Creek basin operates near its hydraulic limit during extreme events and is vulnerable to short, intense rainfalls, underscoring the need for enhanced rainfall monitoring.

Keywords: Urban flooding. Leitão Creek. Extreme precipitation. Climate change. SWMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Diagrama da revisão bibliográfica.....	19
Figura 3-2 - Ciclo Hidrológico.	20
Figura 3-3 - Bacia Hidrográfica.	24
Figura 3-4 - Formas de bacias hidrográficas.	26
Figura 3-5 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.	29
Figura 3-6 Classificações dos modelos hidrológicos.	31
Figura 3-7 - Modelos hidrológicos.	32
Figura 3-8 - Processos simulados pelo SWMM na transformação chuva-vazão.	35
Figura 4-1 – Diagrama da metodologia.	41
Figura 4-2 - Localização das estações de monitoramento hidrológico na bacia do córrego do Leitão.	52
Figura 5-1 - Mapa de localização da área de estudo.....	54
Figura 5-2 - Áreas de risco de inundação.	56
Figura 5-3 - Uso e ocupação do solo da Bacia do Córrego Leitão.	58
Figura 5-4 - Construção do modelo hidrológico da bacia do Córrego Leitão no SWMM.	65
Figura 5-5 - Divisão das sub-bacias.	66
Figura 5-6 - Hidrogramas - TR 2 anos.	68
Figura 5-7 - Hidrogramas - TR 10 anos.	69
Figura 5-8 - Hidrogramas - TR 100 anos.	69

Figura 5-9 - Vazão simulada e precipitação observada em 2020 estação Cercadinho – Exutório.	73
Figura 5-10 - Vazão simulada e precipitação observada em 2020 estação Cercadinho – Sistema.	74
Figura 5-11 - Vazão simulada e precipitação observada em 2017 estação 42 PBH – Exutório.	75
Figura 5-12 - Vazão simulada e precipitação observada em 2017 estação 42 PBH – Sistema.	76
Figura 5-13 - Média mensal de precipitação.	77
Figura 5-14 - Índices de Precipitação.	79
Figura 5-15 - Séries temporais dos índices climáticos Estação Cercadinho.	81
Figura 5-16 - Séries temporais dos índices climáticos Estação 83587.	83
Figura 5-17 - Localização dos pontos críticos 01/12/2017.	85
Figura 5-18 - Localização dos pontos críticos 08/12/2017.	86
Figura 5-19 - Localização dos pontos críticos 04/01/2020.	87
Figura 5-20 - Localização dos pontos críticos 10/10/2020.	88
Figura 01 - Hietrogramas duração 10 min.	100
Figura 02 - Hietrogramas duração 15 min.	100
Figura 03 - Hietrogramas duração 30 min.	101
Figura 04 - Hietrogramas duração 45 min.	101
Figura 05 - Hietrogramas duração 60 min.	101
Figura 06 - Hietrogramas duração 120 min.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 - Áreas e porcentagens das tipologias de uso e ocupação do solo.....	57
Tabela 5-2 - Classes do solo no Córrego do Leitão.....	62
Tabela 5-3 - Valores do coeficiente CN para o cenário de 2021.	64
Tabela 5-4 - Parâmetros calibrados.	67
Tabela 5-5 Vazões de pico (m^3/s) por duração e TR.....	71
Tabela 01 - Vazão simulada do exutório TR 2 anos	103
Tabela 02 - Vazão simulada do exutório TR 100 anos.....	115
Tabela 03 - Nós de enchentes estação cercadinho.....	122
Tabela 04 - Nós de enchentes estação 42 PBH	124

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ai	Porcentagem de áreas impermeáveis.
CAD	Computer Aided Design
CN	Curve Number
Drenurbs	Programa de Recuperação Ambiental de Belo Horizonte
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
H	Profundidade da água na superfície (m).
HEC	Hydrologic Engineering Center
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
ILLUDAS	Illinois Urban Drainage Area Simulator
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MOUSE	Model of Urban Sewer
n	Coefficiente de rugosidade de Manning da superfície.
Ni	Coefficiente de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis.
Np	Coefficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis.
NRCS	Natural Resources Conservation Service
P	Precipitação total (mm).
PBH	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
Pe	Precipitação efetiva (mm).
Prodabel	Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte
Q	Vazão do escoamento superficial (m ³ /s).
SCS	Serviço de Conservação do Solo (Soil Conservation Service)
Si	Armazenamento em depressões nas áreas impermeáveis.
SIG	Sistema de Informação Geográfica
Sm	Declividade média da bacia (m/m).
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
Smax	Retenção potencial máxima.
Sp	Armazenamento em depressões nas áreas permeáveis.

SWMM	Storm Water Management Model
TR	Tempo de Retorno
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
UTM	Universal Transversa de Mercator
V	Velocidade de propagação da cheia.
W	Largura média do escoamento (m).

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	17
2.2	Objetivo geral	17
2.3	Objetivos Específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.2	Ciclo Hidrológico	19
3.3	Precipitação	20
3.4	Escoamento Superficial	21
3.5	Infiltração.....	21
3.6	Evapotranspiração	22
3.7	Bacia Hidrográfica.....	23
3.8	Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas	27
3.9	Eventos hidrológicos extremos.....	28
3.10	Modelagem hidrológica.....	30
3.11	<i>Storm Water Management Model (SWMM)</i>	33
3.12	Ferramentas de análise estatística em hidrologia	37
3.13	Modelagens aplicadas em bacias no Brasil	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	Delimitação e caracterização da área de estudo	42
4.1.1	Uso e ocupação do solo	43
4.2	Plano Diretor, zoneamento e taxa de permeabilidade	44
4.2.1	Geologia, hidrogeologia, pedologia e geomorfologia	45
4.3	Construção do Modelo Hidrológico	46
4.4	Precipitação	49
4.4.1	Precipitações de projeto.....	50

4.4.2	Evento observado	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Caracterização física da bacia em estudo	54
5.2	Análise do uso e ocupação do solo	56
5.3	Estudo do Plano Diretor, zoneamento e taxa de permeabilidade	59
5.4	Caracterização da geologia, hidrogeologia, pedologia e geomorfologia.....	60
5.5	Parâmetros característicos das sub-bacias para modelagem dos fenômenos hidrológicos	64
5.6	Duração crítica das chuvas de projeto	68
5.7	Validação do evento observado	72
5.8	Análise de Tendências nas Séries de Eventos Extremos de Precipitação	78
5.9	Modelagem hidráulica dos locais de inundação	84
6	CONCLUSÃO	90
7	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE A	100
	Chuva de projeto.....	100
	APÊNDICE B.....	103
	APÊNDICE C.....	109
	APÊNDICE D	115
	APÊNDICE E	122
	<i>Report Summary</i> SWMM – Estação Cercadinho	122
	APÊNDICE F	124
	<i>Report Summary</i> SWMM – Estação 42 PBH.....	124

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica do desenvolvimento urbano tem gerado mudanças significativas no uso e ocupação do solo, implicando em impactos ambientais crescentes, especialmente em centros urbanos de grande relevância (Jatobá, 2011). O processo de urbanização acarreta, entre outros efeitos, na impermeabilização do solo, fenômeno que reduz a infiltração da água e intensifica o escoamento superficial. Isso causa um aumento na probabilidade de ocorrência de inundações (Lima-Queiroz; Balabram; Baptista, 2003). Essas alterações comprometem o equilíbrio natural das bacias hidrográficas, que podem gerar riscos à infraestrutura, à segurança da população e à estabilidade socioeconômica, além de pressionar os gestores públicos por soluções embasadas em conhecimento técnico-científico (Tucci, 2008).

Sendo assim, no contexto da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), a urbanização acelerada e muitas vezes desordenada exerce pressões contínuas sobre os recursos hídricos, agravando os impactos de eventos extremos de precipitação. A sub-bacia do córrego do Leitão, localizada na bacia do Ribeirão Arrudas, é um exemplo representativo dos problemas advindos dessas transformações (Reis, 2011). A expansão de áreas impermeabilizadas eleva o escoamento superficial e as vazões de pico, o que resulta em inundações frequentes (Reis, 2011). A Prefeitura de Belo Horizonte identificou cerca de 90 áreas com risco de inundação, documentadas em Cartas de Inundação, que norteiam ações de monitoramento e mitigação (PHB, 2024). Além do prejuízo ambiental, tais eventos geram significativos custos econômicos. De acordo com Silveira et al. (2020), estimativas apontam que, nos períodos chuvosos avaliados de outubro de 2016 a março de 2017 e outubro de 2017 a março de 2018, as inundações resultaram em custos diretos da ordem de R\$ 3.527.696,95, quantia potencialmente subestimada pela não inclusão de danos intangíveis e indiretos. Ademais, um caso recente foi o rompimento da barragem da Lagoa do Nado em 2024, ocasionaram multas de R\$ 68 mil à prefeitura, evidenciando a gravidade e a complexidade da questão (Abalen, 2024).

Nesse sentido, a ineficiência dos sistemas de drenagem urbanos diante de precipitações intensas é agravada por topografia acidentada e a intensa ocupação, que tornam bacias hidrográficas como a do Córrego do Leitão especialmente sensíveis a eventos pluviométricos com totais diários de precipitação superiores a 40 mm (PHB, 2024; Nunes, 2018). Tais cenários revelam vulnerabilidades infraestruturais e a necessidade de intervenções que combinem soluções tecnológicas, planejamento urbano adequado e políticas públicas orientadas para a adaptação

às mudanças climáticas. O entendimento detalhado do comportamento hidrológico dessas bacias, aliado a técnicas de modelagem hidrológica e à análise de períodos de retorno, é uma estratégia para subsidiar o planejamento de obras de drenagem de águas pluviais, a seleção de materiais permeáveis, a implantação de áreas verdes e outras soluções que visem à redução dos riscos e à maior resiliência urbana (Oliveira et al., 2024; Collodel, 2009).

Ademais, as alterações climáticas intensificam a frequência e a severidade de eventos hidrometeorológicos extremos, como chuvas intensas e de curta duração, ampliando o risco de inundações em áreas urbanas. O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC aponta que o aumento da precipitação extrema, aliado à rápida expansão urbana, eleva substancialmente a exposição de pessoas e bens a inundações pluviais em cidades de todo o mundo (IPCC, 2022). Esse cenário global reforça a necessidade de políticas locais que reduzam vulnerabilidades estruturais e sociais, sobretudo em centros metropolitanos como Belo Horizonte.

No âmbito da Agenda 2030, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) estabelece metas para fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos climáticos, integrar medidas de mitigação e adaptação nas políticas nacionais e melhorar a educação e a conscientização sobre mudança do clima. O Relatório de Progresso dos ODS de 2025 destaca que 2024 registrou temperaturas globais 1,55 °C acima dos níveis pré-industriais e o maior número de deslocamentos causados por desastres em 16 anos, resultando em perdas econômicas elevadas e instabilidade social (ONU, 2025). Ao mesmo tempo, o documento sublinha que limitar o aquecimento a 1,5 °C ainda é possível, desde que se adotem ações urgentes e transformadoras, alinhadas às metas do ODS 13.

Inserir a abordagem do ODS 13 nos planos de drenagem urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte significa priorizar soluções baseadas na natureza, expandir a infraestrutura verde-azul, reforçar sistemas de alerta precoce e integrar a gestão de riscos climáticos nos instrumentos de ordenamento territorial. Dessa forma, a análise hidrológica da sub-bacia do Córrego do Leitão não apenas atende a uma demanda técnica local, mas também contribui para o cumprimento das metas globais de adaptação climática, promovendo um desenvolvimento urbano mais seguro e sustentável.

Logo, a relevância deste estudo concentra-se, portanto, na possibilidade de prever o comportamento hidrológico da sub-bacia do Córrego do Leitão durante eventos extremos, fornecendo subsídios técnicos e práticos para a tomada de decisão em gestão ambiental e urbana.

2 OBJETIVOS

2.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a suscetibilidade à inundação na sub-bacia hidrográfica do Córrego Leitão, localizada em Belo Horizonte, por meio de modelagem hidrológica e hidráulica.

2.3 Objetivos Específicos

- Coletar e organizar dados hidrológicos e geoespaciais relevantes da bacia do Córrego Leitão;
- Definir o modelo hidrológico mais adequado à bacia estudada utilizando-se o programa *Storm Water Management Model* (SWMM);
- Ajustar o modelo hidrológico escolhido utilizando trabalhos já realizados na bacia de estudo e dados históricos;
- Avaliar cenários de chuva de projeto aplicado a sub-bacia com diferentes períodos de retorno;
- Realizar a análise de tendências de eventos extremos de precipitação na sub-bacia em estudo;
- Comparar pontos de inundação para diferentes cenários com base em registro de inundações na sub-bacia estudada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

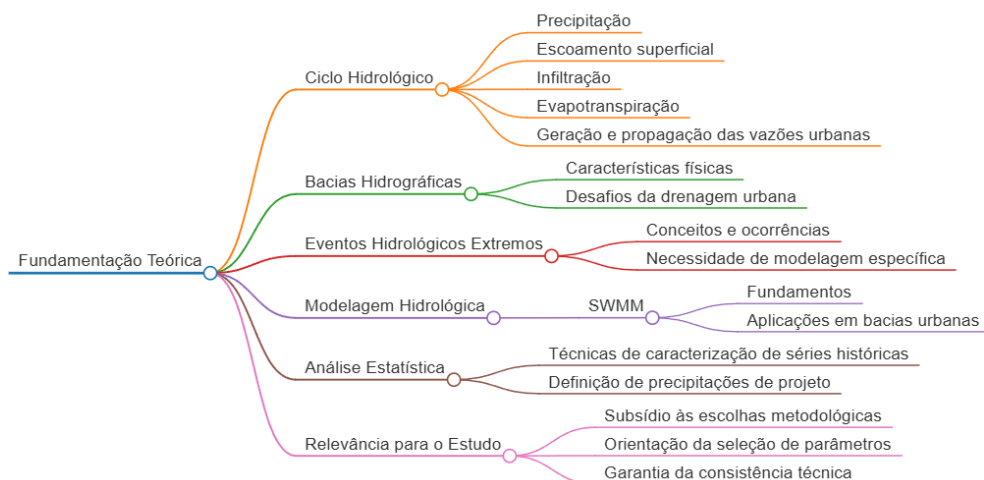
Esta seção apresenta a fundamentação teórica que embasa o desenvolvimento deste trabalho (Figura 3-1), abordando conceitos que embasam à previsão do comportamento hidrológico da bacia do Córrego Leitão durante eventos extremos. A revisão foi estruturada para integrar os principais elementos do ciclo hidrológico precipitação, escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração, que determinam os processos de geração e propagação das vazões em ambientes urbanos.

Ademais, são discutidas as características de bacias hidrográficas e os desafios da drenagem urbana. São abordados também aspectos conceituais e práticos relacionados à ocorrência de eventos hidrológicos extremos e à necessidade de ferramentas de modelagem capazes de estudar essas condições.

Nesse contexto, são apresentados os fundamentos e aplicações do SWMM (USEPA, 2022), amplamente utilizado para simulações hidrológicas e hidráulicas em bacias urbanas, bem como as principais técnicas de análise estatística empregadas na caracterização de séries históricas e na definição de precipitações de projeto.

O desenvolvimento desses tópicos foi importante para subsidiar as escolhas metodológicas, orientar a seleção de parâmetros e garantir a consistência técnica das etapas de simulação e análise de resultados apresentadas nos capítulos subsequentes.

Figura 3-1 - Diagrama da revisão bibliográfica.

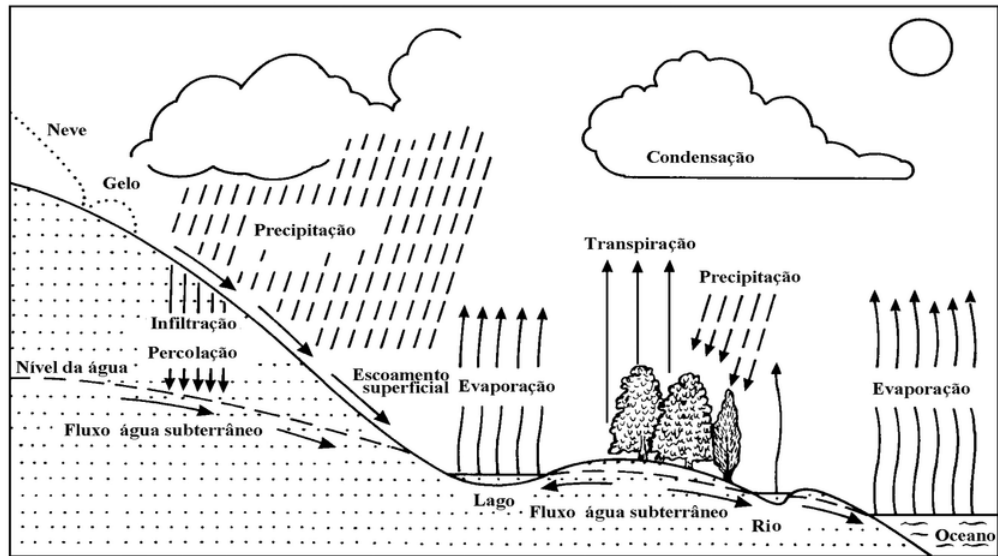


Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é definido como movimento e troca de água entre os diversos sistemas terrestres, que incluem a atmosfera, a superfície terrestre e as reservas subterrâneas. Esse processo dinâmico engloba o transporte e a transformação da água entre os estados sólido, líquido e gasoso, sendo fundamental para o equilíbrio da biosfera. Os principais componentes do ciclo incluem a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração no solo e a evapotranspiração, que conectam e regulam os ciclos hídricos do planeta (Esteves, 1998). A Figura 3-2 ilustra o ciclo hidrológico, destacando seus principais componentes e as interações entre os diferentes sistemas terrestres.

Figura 3-2 - Ciclo Hidrológico.



Fonte: Tucci (2004) apud Pinheiro e Kury (2008).

3.3 Precipitação

A precipitação é definida como águas originadas do vapor atmosférico. Quando as gotículas de água alcançam um tamanho crítico e a força gravitacional supera a sustentação atmosférica, elas são liberadas na forma de precipitação. Assim, depositam-se na superfície terrestre em forma líquida ou sólida. Esse conceito compreende não apenas a chuva, mas também a neve, o granizo, o nevoeiro, o sereno e a geada (Garcez; Alvarez, 1988).

Para os estudos hidrológicos as chuvas são as mais relevantes em análises, especialmente nas zonas tropicais, onde é presente desde eventos de escassez até grandes enchentes. No ciclo hidrológico, as precipitações atmosféricas desempenham um papel crucial ao conectar os fenômenos meteorológicos ao escoamento superficial. Elas podem ser facilmente analisadas com base em características, como intensidade, duração e padrões de distribuição no tempo e no espaço (Garcez; Alvarez, 1988).

3.4 Escoamento Superficial

O escoamento superficial, definido como o fluxo de água sobre a superfície da terra, vinda da chuva e outras origens, é uma parte essencial do ciclo da água. Esse processo tem um grande impacto no transporte de partículas e na erosão causada pela água, alterando a forma dos rios e a vida nos ambientes aquáticos.

O escoamento superficial consiste no deslocamento das águas na superfície terrestre pela influência gravitacional. Essencial para o ciclo hidrológico, esse processo inclui desde pequenas gotas de chuva que escoam em solos saturados ou impermeáveis, até os grandes cursos d'água que deságuam nos oceanos (Garcez; Alvarez, 1988).

Importa observar que, o escoamento superficial, que é o movimento da água sobre a superfície terrestre, está relacionado às precipitações atmosféricas, por exemplo chuva ou neve. Quando ocorre uma precipitação, parte da água infiltra no solo, mas o excesso que não é absorvido ou retido escoa pela superfície, deslocando-se em direção aos rios, córregos e outros corpos d'água. Analisar e quantificar essa relação entre a precipitação e o escoamento é essencial, especialmente para prever eventos de cheias nos cursos d'água (Garcez; Alvarez, 1988).

3.5 Infiltração

A infiltração é o processo pelo qual a água da superfície penetra no solo, movendo-se verticalmente para suas camadas mais profundas através dos poros (Oliveira, 2016). A capacidade de infiltração é definida como intensidade máxima com que o solo pode absorver a água da chuva aplicada em um determinado intervalo de tempo, sob condições específicas. Essa propriedade, geralmente expressa em termos de lâmina por unidade de tempo, é essencial para avaliar o potencial do solo em reter água da superfície (Oliveira, 2016).

Compreender os padrões de infiltração é relevante, considerando sua contribuição para a disponibilidade hídrica no solo. A infiltração tem um papel fundamental no ciclo hidrológico, pois é responsável por regular a divisão da chuva entre o escoamento superficial e a recarga da subsuperfície. Este processo é complexo e influenciado pelas propriedades hidráulicas do solo, a intensidade da chuva e a umidade inicial do solo, que determinam seu funcionamento (Monte-Mor, 2012).

3.6 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo que consiste no retorno da água precipitada para a atmosfera, responsável pelo fechamento do ciclo hidrológico. O fenômeno de evapotranspiração contém dois diferentes processos, sendo eles a evaporação, que ocorre diretamente na superfície, e a transpiração, que é a liberação de vapor d'água pelas plantas (Oliveira, 2016).

Para que a evaporação ocorra de forma natural, é essencial a disponibilidade de energia, geralmente fornecida pelo calor solar. Esse processo envolve a transformação da água no estado líquido para o estado gasoso, na qual as moléculas de água ganham energia suficiente para superar as forças de coesão e escapar da superfície líquida para a atmosfera. Já a transpiração é o processo pelo qual a água presente no solo é transferida para a atmosfera por meio das plantas. As raízes absorvem a água do solo, que é conduzida até as folhas e liberada na forma de vapor através dos estômatos, pequenas aberturas localizadas na superfície das folhas que permitem a passagem do vapor para a atmosfera (Monte-Mor, 2012).

A intensidade desse evento é influenciada por fatores agrupados em categorias: os relacionados à atmosfera, temperatura, insolação, umidade, vento e pressão atmosférica, e os relacionados à superfície evaporante, água livre, solo ou vegetação. Esses fatores estão interligados e compõem o que se chama de "poder evaporante" (Garcez; Alvarez, 1988). A evaporação de um corpo d'água pode ser medida tanto de forma direta, utilizando aparelhos chamados de evaporímetros, quanto de forma indireta, por meio de métodos específicos. Dentre os métodos indiretos disponíveis, o balanço hídrico é uma abordagem bastante utilizada para esse cálculo (Freire; Omena, 2009 apud Oliveira, 2016).

O método do balanço hídrico parte do pressuposto de que os estados de armazenamento de um reservatório não são conhecidos, mas que todas as entradas e saídas de água podem ser mensuradas durante um intervalo de tempo específico. A evaporação é então calculada por meio da Equação 3-1.

$$E = P + A - D - I - \Delta S \quad (3-1)$$

Onde:

- E: evaporação;
- P: precipitação direta sobre o espelho d'água;
- A: afluições;
- D: defluências;
- I: infiltração;
- ΔS : variação no volume de armazenamento no período considerado.

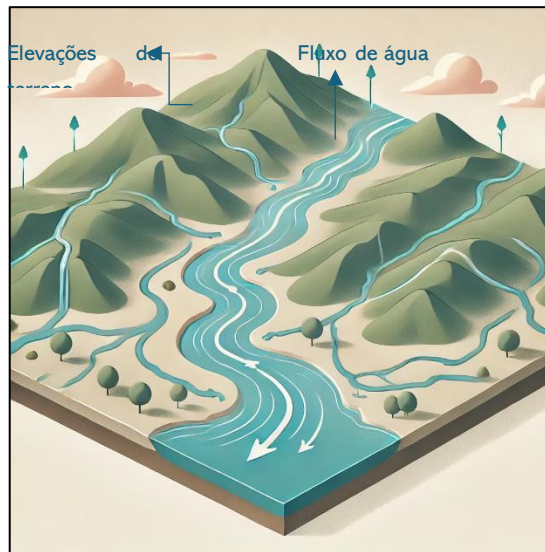
Essa abordagem é amplamente adotada, pois possibilita estimar a evaporação ao se equilibrar as entradas, as saídas e a variação do volume de água armazenado, desde que todos os termos sejam expressos na mesma grandeza. Utilizam-se como unidade de medida:

- Unidades volumétricas (m^3).
- Lâmina de água equivalente sobre a área considerada (mm ou cm por período; desse modo a unidade ficaria como $mm\text{ mês}^{-1}$ ou $cm\text{ mês}^{-1}$), sempre referidas ao mesmo intervalo temporal. Quando o balanço é escrito em termos de fluxos, empregam-se vazões ($m^3\text{ s}^{-1}$).

3.7 Bacia Hidrográfica

Uma bacia hidrográfica é uma região delimitada por elevações do terreno, que definem as áreas de contribuição responsáveis por direcionar o fluxo de água para um ponto de drenagem comum, onde toda a água resultante de chuvas, afluentes ou outros cursos d'água converge para um rio, lago ou reservatório. Essa delimitação é feita com base nas características topográficas, que direcionam o fluxo da água dentro dos limites da bacia (Garcez; Alvarez, 1988). A Figura 3-3 ilustra as elevações do terreno, que atuam como barreiras naturais, bem como o direcionamento do fluxo de água dentro dos limites da bacia.

Figura 3-3 - Bacia Hidrográfica.



Fonte: Adaptado de DALL-E (2025).

Acrescenta-se que a bacia hidrográfica pode ser definida como uma área específica onde toda a vazão hídrica pode ser medida ou monitorada em um ponto de controle no curso d'água, o que viabiliza a análise de suas contribuições hídricas (Garcez; Alvarez, 1988). Em se tratando de estrutura, uma bacia hidrográfica é composta por uma rede de drenagem, que inclui rios, riachos, córregos e nascentes, sendo responsável por coletar e transportar as águas superficiais e subterrâneas (Santana, 2003).

Pode-se dizer, portanto, que a relação entre a bacia hidrográfica e o ciclo hidrológico pode ser compreendida pela forma que a bacia organiza naturalmente o fluxo de água, conforme o volume disponível. Além de armazenar a água, a bacia desempenha o papel de regular o escoamento hídrico (Oliveira, 2016).

Para que o equilíbrio do ciclo da água seja mantido, a configuração da bacia se ajusta às condições do terreno. Por exemplo, ela se torna mais estreita em áreas com maior acúmulo de material ou se expande em regiões mais planas. De forma simplificada, pode-se afirmar que o movimento natural da água em um rio segue uma organização influenciada pelos volumes disponíveis, com o fluxo deslocando-se para os rios mais volumosos, que geralmente recebem contribuições das áreas mais elevadas do relevo dentro da bacia hidrográfica. Em bacias com maior inclinação, o equilíbrio fluvial tende a se concentrar em áreas mais estreitas, enquanto bacias com inclinação mais suave apresentam características mais amplas e largas. Ademais,

nesse contexto, vale destacar a existência de sub-bacias e microbacias hidrográficas. Elas diferem das bacias consideradas "tradicionais" devido à sua menor extensão, que geralmente não alcança grandes distâncias em termos de quilometragem (Oliveira, 2016).

De acordo com Gomes et al. (2021), o enquadramento hierárquico das unidades de drenagem costuma adotar critérios dimensionais que, embora não sejam consensuais, permitem distinguir bacias hidrográficas "tradicionais", sub-bacias e microbacias.

As bacias hidrográficas propriamente ditas correspondem às maiores unidades do sistema, sendo qualificadas como tal quando apresentam área superior a 50 000 ha, limite proposto por Vélez, Núñez e Trujano (2003) apud Gomes et al. (2021), definir a bacia como o território cujas águas convergem para um exutório comum.

No nível imediatamente inferior situam-se as sub-bacias. Os valores-guia para essa categoria variam entre autores, refletindo a diversidade morfológica dos sistemas fluviais, Gomes et al. (2021) apresenta as definições de Faustino (1996) que sugere intervalo de 100 a 700 km², também de Rocha (1997) que propõe limite de 20 000 a 300 000 há, ademais, Vélez, Núñez e Trujano (2003) adotam faixa mais restrita, de 5 000 a 50 000 ha. Esses cortes ilustram não apenas a ausência de consenso, mas também a dependência do contexto fisiográfico em que se aplica a classificação Gomes et al. (2021).

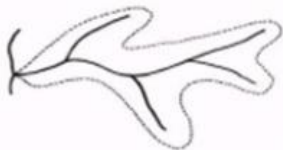
No extremo inferior da escala encontram-se as microbacias, cuja delimitação é a mais controversa. Gomes et al. (2021) apresenta que alguns autores trabalham com áreas de apenas 1 a 100 ha, especialmente quando relacionadas a redes de primeira e segunda ordem (Bahamondes e Gaete 2002). Outros ampliam o intervalo: Vélez, Núñez e Trujano (2003) admitem microbacias entre 3 000 e 5 000 ha, condicionando reduções quando a compartimentação orográfica o permite. Lima (2008) destaca que, em situações particulares, unidades menores que 1 ha ou até 40 ha (podendo chegar a 100 ha) podem ser consideradas microbacias devido à sensibilidade a chuvas intensas e variações de uso do solo. Por fim, diretrizes operacionais da FAO (2018) fixam como limite máximo 700 ha, recomendando tamanhos ideais entre 250 e 350 ha em projetos de manejo comunitário em El Salvador Gomes et al. (2021).

Em síntese, a literatura aponta que abacias hidrográficas excedem, em regra, os 50 000 ha; as sub-bacias ocupam a faixa intermediária, usualmente entre 5 000 e 300 000 há; e as microbacias são definidas de forma mais variável, variando de alguns hectares a poucas centenas.

Entre as principais características que definem uma bacia hidrográfica estão os aspectos físicos, hidrológicos e antrópicos (Teodoro et al., 2007). Entre as características físicas, temos a área da bacia, que determina sua extensão total. A declividade do terreno impacta tanto a velocidade do escoamento superficial quanto o potencial de erosão, enquanto os aspectos geológicos e a composição do solo influenciam a capacidade de infiltração e a recarga de aquíferos. Somado a isso, o tipo de uso e cobertura do solo por exemplo, áreas urbanizadas, florestadas ou agrícolas, influencia diretamente os processos hidrológicos, em especial a infiltração e o escoamento (Reis, 2011).

Outro elemento físico relevante é a rede de drenagem, que estrutura a disposição dos rios e córregos da bacia e pode apresentar formas circular, elíptica ou ramificada, refletindo a configuração do terreno (Reis, 2011). A Figura 3-4 a seguir ilustra as configurações de uma rede de drenagem de bacia hidrográfica.

Figura 3-4 - Formas de bacias hidrográficas.

Formas	Circular	Elíptica	Ramificada
Ilustrações			

Fonte: Christofolletti (1980) apud Reis (2011).

O regime de escoamento também varia entre perene, caracterizado por fluxo constante ao longo do ano, e intermitente, onde o fluxo ocorre apenas em períodos de chuva. Adicionalmente, o índice de precipitação é um fator crucial que regula a disponibilidade hídrica da bacia, enquanto o tempo de concentração, que corresponde ao intervalo necessário para que a água percorra a bacia até o ponto de saída, é outro aspecto fundamental para a compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia (Oliveira, 2016).

Já as características antrópicas, resultantes das ações humanas, também exercem grande influência sobre as bacias hidrográficas. O uso da terra, por exemplo a expansão urbana, as práticas agrícolas e as atividades de mineração, modifica os ciclos hidrológicos naturais, enquanto infraestruturas hidráulicas, que utilizam barragens e sistemas de drenagem, alteram o fluxo de água e sua disponibilidade (Oliveira et al., 2024). Somando a isso, a poluição introduz resíduos químicos, sólidos e biológicos, comprometendo a qualidade da água e impactando os ecossistemas aquáticos.

Diante dos aspectos apresentados, as bacias hidrográficas são de suma valia para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Por serem unidades naturais de captação e transporte de água, elas servem de base para análises de disponibilidade hídrica, controle de enchentes, monitoramento da qualidade ambiental e desenvolvimento sustentável (Reis, 2011; Reis et al., 2012). No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos estabelece, pela Lei n.º 9.433/1997, que a bacia hidrográfica é a unidade territorial de planejamento e de gestão desses recursos, integrando todos os instrumentos e atores do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A compreensão detalhada das características de uma bacia permite a adoção de estratégias adequadas de manejo e conservação.

3.8 Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas

O sistema de drenagem urbana é o conjunto de infraestruturas projetadas para coletar, transportar e dispor as águas pluviais em áreas urbanizadas, com o objetivo de prevenir alagamentos, minimizar os impactos de enchentes e proteger o meio ambiente. Esse sistema é fundamental para manejar o escoamento superficial em cidades, onde o aumento da impermeabilização do solo, devido a pavimentações, construções e outros elementos reduz a infiltração natural e intensifica o volume e a velocidade do escoamento (Almeida, 2020).

Os sistemas de drenagem urbana podem ser divididos em dois componentes principais, sendo eles a drenagem superficial e a drenagem subterrânea. A drenagem superficial abrange as sarjetas, as guias e as valetas, que têm a função de conduzir a água da chuva diretamente para bocas de lobo ou galerias. Por sua vez, a drenagem subterrânea é formada por redes de tubulações e galerias pluviais, que transportam as águas para locais de descarte adequados, os rios, os canais ou os sistemas de retenção (Almeida, 2020).

Outrossim, as estruturas que realizam a drenagem urbana podem ser classificadas de acordo com suas dimensões em sistemas de microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem compreende por exemplo coletores prediais, sarjetas, bueiros, e pequenas e médias galerias, responsáveis pela coleta e condução das águas provenientes do escoamento superficial. Já a macrodrenagem engloba galerias e estruturas de grande porte, por exemplo os corpos receptores, os canais e os rios canalizados, que recebem os volumes de água coletados e os conduzem para fora do ambiente urbano, minimizando os impactos das chuvas intensas (Almeida, 2020).

3.9 Eventos hidrológicos extremos

Eventos hidrológicos extremos são fenômenos naturais caracterizados por condições climáticas que excedem a normalidade histórica e resultam em impactos significativos sobre o ambiente, a sociedade e a economia. Entre os principais eventos hidrológicos extremos estão as cheias, inundações, erosão do solo, secas, tempestades intensas e ondas de calor. Esses fenômenos são, frequentemente, consequências de variações abruptas no ciclo hidrológico, influenciadas por uso do solo e a urbanização (Monteiro, 2013).

As mudanças climáticas têm desempenhado um papel central no aumento da frequência e intensidade desses eventos. A elevação das temperaturas globais provoca alterações nos padrões de precipitação, intensificando tanto os períodos de chuva excessiva quanto os de estiagem prolongada (Nunes, 2018). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o aumento da concentração de gases de efeito estufa intensifica o ciclo hidrológico o que pode resultar em eventos extremos mais severos e imprevisíveis. Por exemplo, chuvas intensas tornam-se mais comuns e causam cheias e inundações em áreas vulneráveis, enquanto períodos de seca tornam-se mais prolongados em regiões áridas, comprometendo os recursos hídricos (Monteiro, 2013).

Ademais, a urbanização, ao alterar as condições naturais, aumenta significativamente o risco de desastres ambientais e amplifica seu potencial de dano o que afeta de maneira mais severa as populações em situação de vulnerabilidade social (Jatobá, 2011)

Nesse contexto, as inundações são exemplos de eventos ambientais cujo impacto pode ser intensificado pela urbanização, gerando danos materiais e econômicos consideráveis. As

inundações ocorrem quando a precipitação provoca o transbordamento de um rio, ultrapassando os limites do seu leito maior, que geralmente confina seu fluxo ao leito menor. Esse fenômeno se distingue das enchentes, nas quais o transbordamento não é necessariamente observado. Esses eventos são especialmente evidentes durante as estações chuvosas, particularmente em regiões de clima sazonal, onde as chuvas são mal distribuídas e frequentemente apresentam alta intensidade (Santos Júnior; Santos, 2013). A Figura 3-5 apresenta um perfil esquemático que ilustra o processo de enchente e inundação, destacando as diferenças entre a situação normal, o transbordamento do leito menor e os impactos gerados pela inundação.

Figura 3-5 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.



Fonte: Min.Cidades/IPT (2007) apud Reis (2011).

Ademais das inundações, outros impactos ambientais associados a eventos extremos de precipitação, como a erosão do solo, também são agravados pela urbanização. As chuvas intensas associadas a eventos extremos também intensificam o processo de erosão do solo, especialmente em áreas desmatadas ou mal manejadas (Nunes, 2018). De igual modo, a erosão do solo constitui um processo natural ou induzido por atividades humanas, responsável pela remoção das camadas superficiais do terreno sob ação da água, do vento, do gelo ou da gravidade. Esse fenômeno ocorre quando forças externas superam a resistência do solo, desagregando-o e transportando suas partículas para outros locais (Peloggia, 1997).

Além dos problemas enfrentados com o excesso de chuva existe também o extremo oposto, as secas, que são períodos anormalmente secos em que a disponibilidade de água é insuficiente para atender às necessidades humanas e ecológicas, têm impactos profundos na agricultura,

abastecimento hídrico e geração de energia. O esgotamento de aquíferos e a redução dos fluxos fluviais durante estiagens prolongadas ameaçam tanto a segurança alimentar quanto a qualidade de vida das populações (Monte-mor, 2012).

Portanto, esses eventos hidrológicos extremos frequentemente têm efeitos cumulativos e inter-relacionados. Por exemplo, cheias podem ser seguidas de períodos de seca devido a alterações nos padrões climáticos regionais, criando desafios adicionais para a gestão dos recursos hídricos. A combinação de eventos extremos aumenta a vulnerabilidade das populações e intensifica os impactos socioeconômicos e ambientais (Jatobá, 2011).

3.10 Modelagem hidrológica

Um modelo hidrológico é definido como uma representação matemática que descreve o fluxo de água e seus constituintes sobre uma área específica da superfície ou subsuperfície terrestre. Esses modelos são amplamente utilizados para estudar processos hidrológicos, por exemplo, precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, evapotranspiração (Rennó; Soares, 2003).

Os modelos hidrológicos têm o princípio da relação entre variáveis ambientais e processos físicos, e podem ser aplicados para simular o comportamento de bacias hidrográficas, prever eventos hidrológicos extremos, ou avaliar o impacto de mudanças no uso do solo e no clima. Assim, de acordo com o nível de detalhamento, esses modelos podem ser classificados em pontuais ou distribuídos, estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, e empíricos ou baseados em processos físicos (Rennó; Soares, 2003).

Os modelos hidrológicos, que representam matematicamente os processos físicos, são ferramentas essenciais para análises hidrológicas. Eles podem ser utilizados em estudos sobre os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico, as alterações na vegetação, o uso e a ocupação do solo nas vazões dos corpos d'água, nas previsões e estimativas de vazões, entre outras aplicações (Pontes et al., 2015).

Para utilizar um modelo hidrológico de forma adequada, é fundamental compreender sua estrutura, limitações e a necessidade de calibração em alguns casos. A calibração permite que o modelo represente com maior precisão o fenômeno estudado, considerando que cada modelo

possui uma série de parâmetros associados aos métodos matemáticos utilizados para descrever os processos e características da bacia hidrográfica (Santos, 2009).

Cumprе salientar que as informações disponíveis sobre bacias hidrográficas, geralmente obtidas por meio de observações hidrológicas, são limitadas a séries históricas bastante curtas. Nesse contexto, a modelagem hidrológica desempenha um papel crucial, pois permite, entre outras aplicações, a geração de séries sintéticas de dados e o uso de modelos para estimar informações em bacias que não possuem monitoramento (Santos, 2009).

A modelagem hidrológica tem evoluído significativamente ao longo dos anos, abrangendo modelos variados em termos de escala e objetivos. Essa ferramenta tem sido amplamente empregada na previsão de eventos hidrológicos futuros com potencial de causar impactos adversos, também pode subsidiar a tomada de decisões em políticas públicas (Marinho Filho et al., 2012).

A seleção do tipo de modelo deve considerar as necessidades específicas da aplicação e a disponibilidade dos dados básicos (Rennó; Soares, 2003). Os modelos podem descrever processos em diferentes escalas temporais e espaciais, variando entre representações detalhadas e simplificadas. Modelos detalhados são mais adequados para simular fenômenos em pequenos intervalos de tempo e áreas restritas, enquanto os modelos simplificados são indicados para análises que abrangem grandes extensões territoriais e/ou períodos mais longos, décadas ou séculos. A definição da escala do modelo deve ser compatível com as características do fenômeno em estudo (Rennó; Soares, 2003). Os modelos podem ser divididos em categorias, conforme Figura 3-6.

Figura 3-6 Classificações dos modelos hidrológicos.

Classificação quanto a/ao	Classe	Definição
Tipo de variáveis	Determinístico	Quando para uma mesma entrada o modelo produz a mesma saída, sem consideração dos conceitos de probabilidade.
	Estocástico	Quando pelo menos uma variável tem comportamento aleatório e são considerados os conceitos de probabilidade.

Classificação quanto a/ao	Classe	Definição
Tipo de relação entre as variáveis	Empíricos	Utilizam funções baseadas em observações/análises estatísticas e sem relação com processos físicos.
	Conceituais	Representam os processos físicos envolvidos no fenômeno analisado.
Forma de representação dos dados	Discretos	Buscam a modelagem de períodos isolados da série.
	Contínuos	Representam longos períodos da série e apresentam estrutura mais detalhada.
Existência ou não de relações espaciais	Concentrados	Não consideram a variabilidade espacial das variáveis do processo.
	Distribuídos	Consideram que as variáveis hidrológicas do processo variam espacialmente.
Existência de dependência temporal	Estacionários	Os parâmetros do modelo não variam no tempo.
	Dinâmicos	Os parâmetros do modelo podem variar no tempo.

Fonte: Adaptado de Marinho Filho et al. (2012); Santos (2009); Rennó; Soares (2003).

Existe atualmente muitos modelos hidrológicos à disposição dos profissionais da área de recursos hídricos, podendo ser citados alguns programas por exemplo: SWMM, série Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), série *Hydrologic Engineering Center* (HEC), Model of Urban Sewer (MOUSE), *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), *Illinois Urban Drainage Area Simulator* (ILLUDAS), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) (Shinma, 2011). Collodel (2009) apresentou um resumo comparativo das características de alguns modelos hidrológicos que pode ser visualizado na Figura 3-7. Observa-se maior flexibilidade e abrangência da simulação no SWMM.

Figura 3-7 - Modelos hidrológicos.

Capacidades de Simulação	Modelos			
	CHM	ILLUDAS	IPHS1	SWMM
Múltiplas sub-bacias	x	x	x	x
Entrada de diversos hietogramas	x	-	x	x

Capacidades de Simulação	Modelos			
	CHM	ILLUDAS	IPHS1	SWMM
Evaporação	x	-	-	x
Degelo	-	x	-	x
Escoamento de base	x	x	x	x
Escoamento de superfície de áreas impermeáveis	x	x	x	x
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	x	x	x	x
Áreas diretamente conectadas	-	x	-	x
Balanço hídrico entre eventos	x	-	x	x
Escoamento em sarjetas	x	x	-	x
Propagação em galerias	x	x	x	x
Múltiplas seções transversais	-	-	-	x
Escoamento sob pressão	-	-	-	x
Derivação	-	x	x	x
Estações-elevatórias	-	x	-	x
Armazenamento	-	x	x	x
Cálculo de nível	-	x	x	x
Cálculo de velocidades	-	x	x	x
Simulação contínua	-	-	x	x
Escala do passo de tempo	x	x	x	x
Cálculo de projetos	x	x	x	x
Código computacional disponível	x	x	x	x

Legenda: x Permite simulação

- Não permite a simulação

Fonte: Machado (1981) e Viessman; Lewis 2002 apud Collodel (2009).

A determinação do volume de escoamento e do pico de vazão é um dos pontos importantes na gestão das águas urbanas. Dentre os métodos para calcular essas variáveis, têm-se os modelos computacionais avançados, semelhante ao SWMM (Chow; Maidment; Mays, 1988).

3.11 *Storm Water Management Model (SWMM)*

O SWMM é amplamente utilizado em aplicações relacionadas a bacias urbanas. Desenvolvido originalmente pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) no início da década de 1970, o *software* passou por diversas atualizações realizadas pela própria agência e por empresas especializadas em desenvolvimento de aplicativos. Essas melhorias incluem a integração do software com ambientes de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou CAD, e

incorporação de ferramentas para a apresentação de resultados e o aprimoramento da capacidade de gerenciamento de dados no banco de dados do aplicativo (Righetto, 2009).

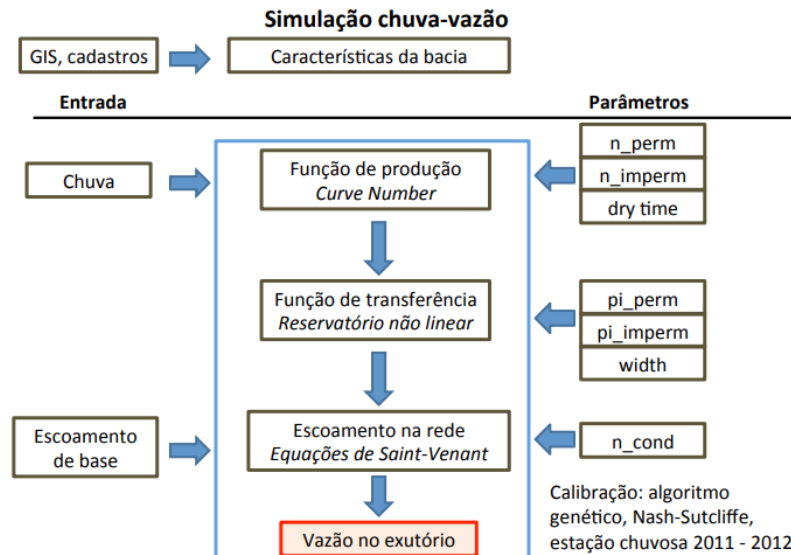
O *software* SWMM é estruturado em diferentes módulos, divididos em quatro módulos de cálculo computacional, cinco módulos de serviços e um módulo executivo. Entre os módulos de cálculo computacional, destacam-se: o módulo *Runoff*, responsável pela transformação da precipitação em vazão; o módulo *Transport*, que trata do transporte na rede de drenagem baseado no conceito de onda cinemática; o módulo *Extran*, dedicado à modelagem hidrodinâmica em condutos e canais; e o módulo *Storage/Treatment*, voltado para o tratamento de águas pluviais (Righetto, 2009). Os dados de entrada para funcionamento do modelo são: precipitação pluviométrica; áreas de contribuição: declividade média, área, percentual permeável do solo; poços de visita: cotas, profundidade, entre outros; tubulações: seção, diâmetro, comprimento e outros mais; nível do lençol freático, poços de bombeamentos (Righetto, 2009).

Assim, de acordo com o manual do usuário desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, da Universidade Federal da Paraíba, o SWMM é um modelo dinâmico de transformação chuva-vazão que permite simular tanto a quantidade quanto a qualidade do escoamento superficial, sendo especialmente útil em áreas urbanas. Ele pode ser aplicado para a análise de eventos isolados de precipitação ou para simulações contínuas de longo prazo. No que se refere ao escoamento superficial, o modelo opera com sub-bacias hidrográficas que recebem precipitação e geram escoamentos e cargas poluentes. O módulo hidráulico do SWMM simula o transporte dessas águas por meio de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e estruturas de controle. Acrescenta-se que o *software* acompanha a evolução da quantidade e qualidade do escoamento em cada sub-bacia, características de vazão, altura do escoamento e qualidade da água em cada tubulação e canal ao longo do período de simulação, dividido em intervalos de tempo.

A transformação da chuva em vazão nas sub-bacias é realizada por meio de dois processos principais: a função de produção, que divide o volume de precipitação entre os componentes de interceptação, armazenamento superficial e infiltração, convertendo a precipitação total em precipitação efetiva; e a função de transferência, que descreve o movimento do escoamento

superficial até o exutório da sub-bacia. Essa dinâmica está representada graficamente na Figura 3-8 (Silva et al., 2015 apud Cândido, 2015).

Figura 3-8 - Processos simulados pelo SWMM na transformação chuva-vazão.



Fonte: Silva et al. (2015) apud Cândido (2015).

Os parâmetros são definidos da seguinte forma: CN (adimensional) – *Curve Number*; f_0 e f_c (em mm/h) – taxas mínima e máxima, respectivamente, para a curva de infiltração de Horton; arm (em mm) – armazenamento superficial na parte permeável (perm) e impermeável (imperm); n (adimensional) – coeficiente de rugosidade das superfícies permeáveis (perm), impermeáveis (imperm) e nos condutos e canais (cond); largura (m) – largura das sub-bacias.

O método CN, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service (SCS)*, estabelece uma relação entre chuva e vazão com base na precipitação total, no volume de escoamento superficial e na capacidade de infiltração da bacia hidrográfica (Naghetini, 1997). A capacidade de infiltração do solo, representada pelo parâmetro "S", é calculada a partir do *Curve Number*, que reflete o grau de urbanização e as características da bacia e do tipo e uso do solo. O CN varia de 1 a 100, indicando condições que vão desde solos altamente permeáveis até totalmente impermeáveis, e de solos com alta capacidade de infiltração para solos com baixa infiltração (Tucci, 2005).

O SWMM permite a modelagem do processo de infiltração por meio de três métodos principais: Horton, Green-Ampt e SCS. Neste trabalho, optou-se pelo método SCS por ser um método simplificado, pela exigência de fornecimento de apenas um parâmetro, o CN, e devido à

ausência de dados medidos em campo que possibilitassem a calibração dos parâmetros requeridos pelos modelos Horton e Green-Ampt. Além desses fatores, também se considerou a existência de trabalhos anteriores que utilizaram o método SCS em bacias urbanas de características semelhantes, assim como a dificuldade prática de coleta de dados detalhados em campo no contexto desta pesquisa.

A determinação da precipitação efetiva (Pe) no modelo SCS é feita a partir de dois parâmetros principais: a retenção potencial máxima (S_{max}), sendo este último usualmente definido como 20% de S_{max} . A Equação 3-2 utilizada para o cálculo da precipitação efetiva é expressa por (NRCS, 2004):

$$Pe = \frac{(P - 0,2 \cdot S_{max})^2}{P + 0,8 \cdot S_{max}} \quad (3-2)$$

em que:

- Pe = precipitação efetiva (mm);
- P = precipitação total (mm);
- S_{max} = retenção potencial máxima do solo (mm).
- O parâmetro S_{max} , por sua vez, é determinado pela Equação 3-3.

$$S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-3)$$

Conforme Silva et al. (2015) e Huber e Dickinson (1992), o escoamento superficial é representado por meio da abordagem de reservatórios não-lineares. Nesse modelo, a relação entre a altura da lâmina d'água na superfície da bacia e a vazão de saída é descrita por uma equação não-linear, apresentada na Equação 3-4.

$$Q_s = W \times 1/n \times (d - d_p)^{5/3} \times S_0^{1/2} \quad (3-4)$$

A vazão no exutório da sub-bacia (Q_s) é influenciada por diversos fatores, sendo eles a largura de drenagem da sub-bacia (W) que é o comprimento em metros do trajeto percorrido pela água superficial desde o ponto mais distante da sub-bacia até a seção onde o escoamento se torna canalizado, o coeficiente de Manning do canal (n), a profundidade da lâmina d'água em mm

(d), a profundidade da lâmina d'água em mm armazenada em depressões (dp) e a declividade do terreno (S_0). Após ser gerada, a vazão no exutório pode ser direcionada para outra sub-bacia ou para um nó de entrada da rede de drenagem, composta por condutos. A propagação da onda de cheia nos canais dessa rede é simulada utilizando as equações de Saint-Venant (Equação 3-5, 3-4:), cuja abordagem, seja pela onda cinemática ou dinâmica, pode ser definida pelo usuário de acordo com os objetivos específicos da simulação (Silva et al., 2015; Huber; Dickinson, 1992).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad (3-5)$$

Na Equação 3-5, A indica a área da seção transversal do escoamento (m^2), V é a velocidade média do fluxo ($m s^{-1}$) e Q corresponde à vazão na direção do eixo x ($m^3 s^{-1}$). O parâmetro h representa a profundidade da água (m), enquanto I descreve a declividade do fundo do canal (adimensional, mm^{-1}). Já q expressa a vazão lateral por unidade de comprimento ($m^2 s^{-1}$), g é a aceleração gravitacional (ms^{-2}), e J é a perda de carga linear associada ao escoamento.

3.12 Ferramentas de análise estatística em hidrologia

Os projetos de engenharia, especialmente os de recursos hídricos, enfrentam incertezas relacionadas às condições futuras, entre elas a variação das vazões. Para lidar com essas incertezas, utilizam-se hipóteses fundamentadas e fatores de segurança nos dimensionamentos. Ressalte-se, ainda, que a aplicação de leis de probabilidade e análise estatística de séries históricas de eventos hidrológicos permite identificar variações prováveis e realizar projeções para períodos futuros, e garante que o planejamento e a execução dos projetos sejam realizados com riscos calculados (Barbosa Júnior, 2022).

A curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é uma representação gráfica que estabelece a relação entre a intensidade da precipitação, sua duração e a frequência de ocorrência em uma determinada região. Essa ferramenta é amplamente utilizada na engenharia hidráulica e na hidrologia para o dimensionamento de sistemas de drenagem, avaliação de eventos extremos

de chuva e gestão de riscos hídricos. A construção das curvas IDF baseia-se em séries históricas de dados pluviométricos e modelos estatísticos, que permite prever a probabilidade de chuvas intensas em diferentes períodos de retorno, sendo essencial para o planejamento e a mitigação de inundações em áreas urbanas. Dessa forma, as curvas IDF são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de hietogramas¹ de tempestades de projeto, fornecendo informações fundamentais para o planejamento e a gestão de infraestruturas de drenagem urbana. Contudo, com o aumento da frequência de eventos extremos de precipitação e a crescente vulnerabilidade dos ambientes urbanos, tem havido um maior engajamento por parte de municípios, empresas e profissionais da engenharia em realizar análises confiáveis desses eventos. Esse interesse busca identificar incertezas e estabelecer procedimentos para atualizações regulares das curvas IDF (Hailegeorgis et al., 2013 apud Nunes, 2018).

A análise de séries temporais extensas é importante para avaliar tendências de forma confiável e identificar possíveis mudanças, especialmente no contexto de planejamento a longo prazo. Como a análise depende diretamente dos dados disponíveis, a estimativa de eventos extremos deve ser periodicamente atualizada. Essa prática busca não só garantir a gestão adequada e a avaliação do desempenho de infraestruturas hídricas, como também auxiliar na identificação de vulnerabilidades e na análise de riscos (Hailegeorgis et al., 2013 apud Nunes, 2018).

Na previsão de enchentes, que consiste em determinar a magnitude das vazões máximas críticas de cheias para projetos, recorre-se ao uso de modelos probabilísticos. Esses modelos utilizam um enfoque estatístico para estabelecer a relação entre as descargas máximas e suas frequências de ocorrência, baseando-se em séries temporais construídas a partir de dados observados. A principal premissa desses modelos é que as cheias registradas em determinado período podem se repetir no futuro, sob condições hidrológicas semelhantes, com uma expectativa estatística de recorrência (Barbosa Júnior, 2022).

¹ Os hietogramas são representações da distribuição temporal da precipitação pluvial (de Faria, 2018).

3.13 Modelagens aplicadas em bacias no Brasil

Rosa et al. (2024) utilizaram o SWMM versão 5.1 para a modelagem hidrológica e hidráulica da bacia do Ribeirão Arrudas (MG) para subsidiar a elaboração de um Plano de Contingência de Inundações do Boulevard Arrudas. Foram analisados sete cenários, sendo que o primeiro deles foi o cenário atual da bacia. Em seguida, foram aplicados outros seis cenários alternativos de modelagem, considerando o contexto de máximo uso do solo na bacia, bem como incorporando as bacias de retenção em construção e projetadas.

O modelo SWMM conseguiu alcançar uma boa representação dos eventos extremos observados e monitorados entre 2011 e 2020. Os autores indicaram que o coeficiente de Nash-Sutcliffe² alcançou valores considerados satisfatórios, com média total de 0,72 e o desvio padrão de 0,17. Segundo Rosa et al. (2024), a representação dos alertas tivera resultados satisfatórios, com uma taxa média geral de acerto de 74%, 17% de subestimação e 9% de superestimação. Com o uso da simulação foi possível mapear as inundações em todos os cenários, além de desenvolver o desenvolver o estudo da vulnerabilidade e a elaboração do Plano de Contingência de Inundações.

Os autores Costa, Tsuji e Koide (2021) empregaram o SWMM para modelagem hidrológica e hidráulica do sistema de drenagem urbana na Região Administrativa do Riacho Fundo I, no Distrito Federal, a partir dos dados de chuva e vazão monitorados em 21 eventos entre 2018 e 2019. O estudo teve como objetivo analisar a calibração do modelo chuva-vazão, a fim de validar o uso da ferramenta na gestão de drenagem urbana.

No estudo, utilizaram o programa PCSWMM, da CH2M Hill, na versão 7.2, que corresponde ao modelo SWMM acoplado a um SIG. De acordo com o trabalho, a área de estudo foi dividida em sub-bacias de contribuição em que para cada uma delas o CN foi calculado por média ponderada, por meio do método SCS para geração do escoamento. Além disso, foi necessário considerar a parcela de perda por evaporação, computada pelo método de Hargreaves para a

² O coeficiente de Nash-Sutcliffe é uma medida estatística normalizada que determina a magnitude da variância residual entre os valores previstos do modelo e os valores observados. Ele pode variar de $-\infty$ a 1, em que 1 indica ajuste perfeito do modelo, o valor de 0 ou inferior representa que o modelo não é melhor que usar a média para a simulação ou previsão (Moriarty et al., 2007; Nash; Sutcliffe, 1970)

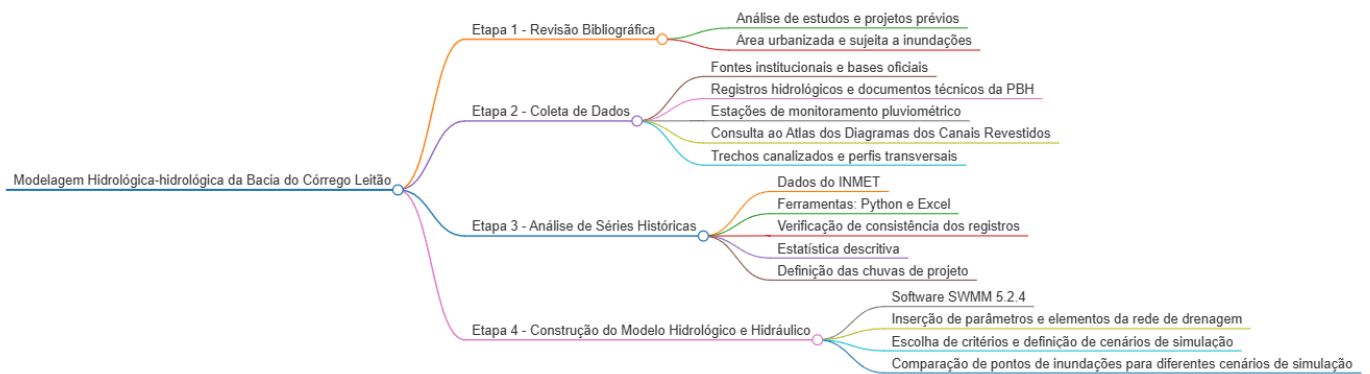
realização de uma simulação contínua. Os autores consideraram a solução satisfatória, pois apresentou Nash-Sutcliffe de 0,851, coeficiente de determinação (R^2) de 0,865 e erro quadrático integrado de 4,64 e outras funções-objetivo com bom desempenho, o que indica pequenas diferenças entre os valores observados e simulado.

O SWMM foi utilizado por Garcia e Paiva (2006) para avaliar a aplicabilidade na bacia hidrográfica urbana do Arroio Canela (RS). Para as análises de sensibilidade foram considerados os parâmetros ao módulo Runoff foram: largura das sub-bacias (W), porcentagem de áreas impermeáveis (AI), coeficiente de rugosidade de Manning nas sub-bacias (n), capacidade de infiltração (I) e a altura de armazenamento (d). De acordo com o estudo, foi analisada a influência da urbanização no hidrograma de cheia ao longo de três décadas (1980-2004). Com isso, os autores identificaram que a porcentagem de área impermeável e a largura da sub-bacia são os parâmetros do modelo mais sensíveis para prever o pico de vazão. O crescimento desordenado da área urbana e o aumento da impermeabilização do solo apontado no trabalho foram responsáveis por intensificar as cheias, sendo necessário medidas urgentes de planejamento urbano sustentável para mitigar esses impactos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos adotados para a previsão do comportamento hidrológico da bacia do Córrego Leitão em eventos extremos, com foco na modelagem hidrológica e análise de períodos de retorno. A abordagem foi dividida em etapas interdependentes, conforme descrito na Figura 4-1.

Figura 4-1 – Diagrama da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2025).

A etapa inicial deste trabalho envolveu revisão bibliográfica, acompanhada da análise de estudos e projetos previamente elaborados para a bacia hidrográfica do córrego do Leitão. Por se tratar de uma área urbanizada e historicamente sujeita a episódios de inundação, diversos levantamentos e intervenções já foram executados na região, tais como as iniciativas desenvolvidas diretamente pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (FCO, 2022; Rosa, 2017).

A coleta dos dados necessários ao desenvolvimento deste estudo foi realizada por meio de diferentes fontes institucionais e bases de dados oficiais. Inicialmente, foram obtidas informações diretamente junto à Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), compreendendo registros hidrológicos e documentos técnicos referentes à bacia estudada. Foram coletados dados provenientes das estações pluviométricas que monitoram a precipitação e os níveis de

escoamento na região, que permite a caracterização das condições históricas e a estimativa das chuvas de projeto.

Adicionalmente, foi consultado o cadastro Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem Urbana, que contém informações detalhadas sobre os trechos canalizados, perfis transversais, geometria e características construtivas dos condutos, essenciais para a definição dos parâmetros hidráulicos no modelo.

A terceira etapa consistiu na análise das séries históricas de precipitação obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para essa etapa, foram utilizadas ferramentas de processamento de dados e estatística implementadas em Python e complementadas com planilhas eletrônicas no Microsoft Excel. As análises contemplaram a verificação de consistência dos registros, estatística descritiva, cálculo de totais acumulados e identificação de eventos críticos, que subsidiaram a definição das chuvas de projeto e a caracterização do regime pluviométrico da área de estudo.

A quarta etapa correspondeu à construção do modelo hidrológico e hidráulico, desenvolvida no software SWMM 5.2.4 (Rossman; Simon, 2022). Nessa fase, foram inseridos os parâmetros das sub-bacias, trechos de condutos, nós, pluviômetros e demais elementos necessários para representar a rede de drenagem da bacia do córrego do Leitão.

4.1 Delimitação e caracterização da área de estudo

Na pesquisa desenvolvida neste trabalho, foi escolhida como área de estudo a bacia hidrográfica do Córrego do Leitão, localizada no município de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. A caracterização foi realizada de modo a descrever os seguintes aspectos: limites e divisão em sub-bacias, uso e cobertura do solo, rede de drenagem pluvial existente, características topográficas, declividades médias e parâmetros hidrológicos e hidráulicos necessários à construção do modelo computacional.

Para a caracterização física da bacia hidrográfica do córrego do Leitão, foram utilizados dados oficiais disponibilizados pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel), por meio da plataforma cartográfica BHMap (Prodabel, 2025?). Esse conjunto de informações incluiu arquivos georreferenciados da base topográfica municipal, abrangendo a delimitação de arruamentos, quadras, lotes, edificações, praças, rede de drenagem

pluvial, a divisão em bacias e sub-bacias hidrográficas, incluindo a bacia Santa Lúcia que foi considerada como uma sub-bacia. Essa barragem Santa Lúcia de retenção construída foi para controlar o volume escoado das sub-bacias de contribuição, reduzindo significativamente o pico de vazão na rede pluvial urbana (Perché, 2015). A utilização dessas bases possibilitou a representação detalhada do ambiente urbano, oferecendo subsídios para a delimitação precisa das áreas de contribuição, a análise das características do relevo e a definição dos parâmetros espaciais.

4.1.1 Uso e ocupação do solo

A caracterização do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do córrego do Leitão foi realizada a partir da integração de dados históricos e dados geoespaciais recentes. Inicialmente, foram consideradas informações qualitativas descritas por Borsagli (2011), que evidenciaram o processo contínuo de verticalização e adensamento construtivo nos bairros Santo Antônio, Luxemburgo e Vila Paris, fenômeno que se intensificou a partir do ano de 2010 com a substituição progressiva de edificações unifamiliares por prédios verticais.

Para obter um panorama atualizado, foi utilizada a camada digital denominada “Tipologia de Uso e Ocupação do Lote – 2022”, disponibilizada pela Prefeitura de Belo Horizonte por meio da plataforma BHMap (Prodabel, 2025?). Essa base vetorial, que contém os dados cadastrais de todos os lotes urbanos do município, foi importada para o software QGIS 3.44.11. A camada foi reprojetada para o sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S (EPSG 31983), assegurando a compatibilidade geométrica com os demais dados da bacia e possibilitando medições de área e análises espaciais com coerência métrica.

Com o processamento dos dados, foi possível quantificar e classificar os lotes conforme sua tipologia de uso, identificando seis categorias principais: residencial, não residencial, misto, lote vago, parque e sem informação cadastral.

O mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Córrego Leitão foi elaborado com base em dados cartográficos fornecidos pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2023), processados em ambiente SIG no software QGIS. As classes de uso foram organizadas em sete categorias principais. A composição cartográfica foi complementada com imagem de satélite obtida pelo plugin QuickMapServices, utilizando a camada do Google Satellite. A visualização final

incorpora legenda, escala gráfica, norte e mapa de localização, garantindo clareza e precisão espacial

Essa etapa permitiu obter uma representação atualizada e detalhada da ocupação do solo, essencial para o desenvolvimento da modelagem hidrológica, bem como para a compreensão dos impactos do uso do território sobre a drenagem e o escoamento superficial na bacia do córrego do Leitão.

4.2 Plano Diretor, zoneamento e taxa de permeabilidade

A análise do Plano Diretor, do zoneamento urbano e das taxas de permeabilidade aplicáveis à bacia do córrego do Leitão foi conduzida a partir da Lei Municipal nº 11.181/2019, que regulamenta a política urbana do município de Belo Horizonte. Inicialmente, foram consultados o texto integral da legislação, seus anexos e mapas oficiais de zoneamento, disponíveis no portal da Prefeitura de Belo Horizonte, também as publicações complementares e materiais técnicos de apoio (PBH, 2019; 2020b; 2024).

O estudo contemplou a identificação das categorias de zoneamento que incidem sobre a área de estudo, com destaque para os bairros classificados em zonas de ocupação moderada (Santa Lúcia, São Bento, Cidade Jardim e Santo Antônio), e as porções mais adensadas da bacia, enquadradas em zonas de ocupação preferencial. Para cada categoria, foram compilados os parâmetros urbanísticos principais, além dos limites de ocupação, altura máxima, coeficientes de aproveitamento e, principalmente, os índices mínimos de permeabilidade obrigatória dos lotes.

Os dados foram obtidos a partir do BHMap (Prodabel, 2025?) e consultados diretamente nas tabelas de atributos no ambiente do QGIS 3.44.11, contemplando parâmetros urbanísticos relevantes, tais como índices de permeabilidade mínima, categorias de zoneamento e restrições específicas aplicáveis aos lotes localizados nas áreas de fundo de vale e nas Áreas de Diretrizes Especiais (ADEs) identificadas. Adicionalmente, foram utilizados materiais complementares, incluindo publicações técnicas e relatórios elaborados pela Prefeitura, a fim de esclarecer dispositivos legais relacionados à drenagem urbana e à sustentabilidade ambiental.

Essa análise teve por objetivo identificar de que modo as regulamentações urbanísticas e ambientais buscam prevenir a ocorrência de alagamentos na bacia do córrego do Leitão,

evidenciando a preocupação institucional em compatibilizar o adensamento urbano com medidas que favoreçam a drenagem e a infiltração de águas pluviais.

4.2.1 Geologia, hidrogeologia, pedologia e geomorfologia

A caracterização geológica, hidrogeológica, pedológica e geomorfológica da bacia hidrográfica do córrego do Leitão foi realizada com base em levantamentos documentais e dados secundários obtidos em referências técnicas. Essa etapa teve o objetivo de reunir informações sobre as formações rochosas, as características do solo e as condições hidrogeológicas que influenciam o comportamento do escoamento superficial e a infiltração na área de estudo.

Para isso, foram consultados trabalhos de referência, como, por exemplo, os estudos de Reis (2011), Sousa (1998), Costa (2002), Ramos (1998) e Rosa (2017), que fornecem descrições detalhadas das unidades geológicas presentes na região, os principais grupos litológicos, a composição dos materiais superficiais, os parâmetros de condutividade hidráulica e profundidade do lençol freático. Além do mais, foram incorporadas as informações do zoneamento pedológico oficial do município, incluindo a classificação dos solos em grupos hidrológicos conforme os critérios do Soil Conservation Service (NRCS).

Os dados sobre unidades litoestratigráficas e formações geológicas foram sistematizados com base na revisão de mapas geológicos e descrições textuais extraídas dessas referências. As informações relativas à profundidade do lençol freático, condutividade hidráulica dos solos e características dos aquíferos livres foram obtidas a partir de levantamentos específicos realizados em poços de monitoramento distribuídos pelo município, conforme descrito por Costa (2002).

A classificação pedológica foi fundamentada nos critérios da EMBRAPA (2011) e nas análises compiladas por Rosa (2017), que detalham as classes de solo predominantes na área de estudo. Para identificação do grupo hidrológico dos solos, foi utilizada a proposta metodológica apresentada por Ramos (1998), considerando a posição relativa da bacia em relação à calha do ribeirão Arrudas, complementada pela avaliação crítica das limitações dessa abordagem frente à heterogeneidade geológica local.

Os dados sobre o uso e cobertura do solo e o parâmetro hidrológico Curve Number (CN) foram obtidos diretamente da base oficial disponibilizada pela Prefeitura de Belo Horizonte, por meio

da plataforma BHMap (Prodabel, 2025?). Para assegurar compatibilidade entre camadas e dados vetoriais, os arquivos foram importados no ambiente QGIS 3.44.11, reprojetados e verificados pela tabela de atributos.

Essa metodologia permitiu integrar dados secundários de diferentes estudos com as informações mais recentes disponibilizadas pela Prefeitura, de modo a compor um diagnóstico físico-ambiental da bacia, fornecendo os parâmetros necessários à etapa de modelagem hidrológica.

4.3 Construção do Modelo Hidrológico

Neste estudo não foram realizadas a calibração e a análise de sensibilidade devido às limitações de tempo e à complexidade do modelo analisado, que envolve múltiplas sub-bacias, estruturas hidráulicas subterrâneas, e um número elevado de parâmetros a serem ajustados. Diante dessas restrições operacionais e temporais, optou-se por utilizar uma pesquisa já desenvolvida e validada, de modo a assegurar a consistência técnica do modelo hidrológico adotado, sem comprometer a qualidade das simulações realizadas.

A primeira etapa da modelagem consistiu na coleta e preparação dos dados espaciais necessários para a representação físico-territorial da bacia do córrego do Leitão. As informações cartográficas foram obtidas a partir do sistema BHMap (Prodabel, 2025?).

As camadas utilizadas incluíram: bacia hidrográfica, sub-bacias hidrográficas, cursos d'água, declividade do terreno. Cada uma das camadas espaciais incorporadas ao modelo desempenhou funções específicas na caracterização da bacia. A camada de bacia hidrográfica definiu o limite geral da área de contribuição, permitindo delimitar o perímetro de influência hidrológica. As sub-bacias hidrográficas possibilitaram a divisão interna da bacia em unidades menores, para a modelagem. A camada de cursos d'água identificou o traçado do rio e dos canais, servindo como base para a localização dos pontos de exutório e para a definição dos nós de conexão no modelo. Por fim, as informações de declividade do terreno forneceram parâmetros para o cálculo da velocidade do escoamento.

Esses dados foram inseridos e tratados no software QGIS 3.44.11, onde passaram por procedimentos de verificação de projeção cartográfica, recorte da área de interesse e cruzamento de informações espaciais.

Durante esse processo, foi verificado que alguns cursos d'água presentes na bacia não possuíam cadastro formal junto à Prefeitura. Para garantir a continuidade hidrológica no modelo, os trechos não cadastrados foram agrupados em sub-bacias cujo exutório correspondia a trechos de canais com cadastro oficial, possibilitando a associação correta aos nós de entrada no modelo hidrológico.

A camada de cursos d'água foi também utilizada para identificar os rios canalizados e canais subterrâneos, cuja modelagem exigiu tratamento específico. Dessa forma, foi possível estabelecer a delimitação final das sub-bacias adotadas, a identificação dos cursos cadastrados e não cadastrados.

A modelagem hidrológica foi desenvolvida com o uso do software SWMM (Usepa, 2022), na sua versão 5.2.4 (Rossman; Simon, 2022). O primeiro passo consistiu na elaboração de um modelo topológico, que representa a rede de drenagem da bacia, por meio da inserção de sub-bacias, condutos, nós de junção, exutórios, unidades de armazenamento e pluviômetros que compõem a estrutura fundamental do modelo e são descritos a seguir.

Sub-bacias: correspondem a unidades hidrológicas delimitadas de modo que a topografia e os elementos do sistema de drenagem direcionem o escoamento superficial para um único ponto de descarga. No SWMM, o usuário define o número de sub-bacias que compõem a área de estudo e indica o ponto de saída de cada uma. Esses pontos de descarga podem atuar como nós do sistema de drenagem ou como pontos de entrada de outras sub-bacias (LENHS, 2012).

Nós de Conexão: representam locais do sistema onde diferentes trechos de drenagem se interligam. Esses objetos podem corresponder, na prática, a confluências de canais naturais, poços de visita da rede de drenagem urbana ou elementos que unem tubulações distintas (LENHS, 2012).

Nós Exutórios: são os pontos terminais do sistema de drenagem, responsáveis por estabelecer as condições de contorno a jusante, ao final do escoamento no modelo (LENHS, 2012).

Condutos: consistem em tubulações ou canais que conduzem a água entre os nós do sistema. As seções transversais dos condutos podem ser especificadas pelo usuário, que pode escolher entre diferentes formatos geométricos, compreende também seções abertas ou fechadas, conforme as opções disponibilizadas no software (LENHS, 2012). A maior parte dessas seções

assume formatos retangulares, trapezoidais ou irregulares, sendo possível configurar a geometria conforme as características do projeto (LENHS, 2012).

Pluviômetros: têm a função de fornecer os dados de precipitação que incidem sobre uma ou mais sub-bacias delimitadas na área de estudo. As informações podem ser inseridas no modelo por meio de séries temporais criadas pelo usuário ou importadas de arquivos externos contendo registros pluviométricos (LENHS, 2012).

Para cada componente, foi necessário definir suas principais características hidráulicas e hidrológicas.

O modelo de infiltração adotado foi o SCS Curve Number (CN), o qual exige, além do valor do CN, a definição do tempo de secagem do solo, parâmetro que representa o intervalo necessário para que um solo saturado retorne à sua condição de umidade inicial.

As sub-bacias utilizadas na modelagem foram delimitadas com o apoio do software QGIS 3.44.11, a partir da análise da topografia e da rede de microdrenagem existente. Esse procedimento seguiu a lógica empregada pela Prefeitura de Belo Horizonte na discretização da bacia em unidades mais homogêneas em termos de declividade e uso do solo. Ao final desse processo, foram definidas 15 sub-bacias.

Os parâmetros incorporados a partir do estudo de referência incluíram o percentual de área impermeável (A_i), a largura característica do escoamento superficial (W), a declividade média (%S), os coeficientes de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis (N_i) e permeáveis (N_p), além da profundidade de armazenamento em depressões (S_i e S_p). Esses parâmetros foram inicialmente obtidos a partir do estudo de Rosa (2017) e estão organizados nos resultados na Tabela 5-4.

Os valores dos CN médios foram determinados com base nos dados disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte, conforme detalhado anteriormente. No que se refere à largura característica do escoamento superficial, adotou-se o valor previamente calibrado por Rosa (2017).

Em relação aos condutos, os parâmetros inseridos no modelo incluíram a forma geométrica da seção, profundidade máxima, comprimento e o coeficiente de rugosidade de Manning (n). Os

dados geométricos foram extraídos das fichas cadastrais dos canais disponibilizadas pela Prefeitura, enquanto o valor do coeficiente de rugosidade adotado inicialmente foi $n = 0,014$, conforme ajuste realizado por Rosa (2017).

Como mencionado anteriormente, para geração do modelo da bacia do córrego Leitão, este trabalho utilizou como referência o estudo de Rosa (2017), que desenvolveu um modelo hidrológico detalhado composto por 28 sub-bacias e parâmetros previamente calibrados com base em simulações. Nesse trabalho, optou-se por adotar a divisão de sub bacias disponibilizadas pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) no sistema BHMap (Prodabel, 2025?). Essa configuração, que apresenta uma subdivisão com um menor número de sub bacias, resultou na definição de 15 sub-bacias (Figura 4.3).

Para compatibilizar os parâmetros hidrológicos entre o modelo desenvolvido neste trabalho e o modelo de Rosa (2017), foi identificado as sub-bacias definidas por Rosa (2017) que se sobrepõem à nova malha de sub-bacias empregada no presente estudo. Em seguida, para cada grupo de sub-bacias originais que correspondia a um único polígono na configuração espacial atual, calculou-se a média dos valores de cada parâmetro hidrológico. Essa escolha baseou-se na necessidade de manter a coerência com os valores calibrados por Rosa (2017). Dessa forma, o processo garantiu que os parâmetros herdados de Rosa fossem representados de modo uniforme e compatível com a nova subdivisão territorial, minimizando discrepâncias introduzidas pela agregação espacial e assegurando que o modelo ajustado mantivesse consistência hidrológica com as calibrações previamente estabelecidas no outro trabalho.

4.4 Precipitação

As precipitações utilizadas na modelagem hidrológica corresponderam a chuvas de projeto estimadas para diferentes períodos de retorno, obtidas por meio de método regional de estimativa de intensidades, conforme a metodologia proposta por Pinheiro e Naghettini (1998). Além dessas séries sintéticas, foram também selecionados eventos reais de precipitação com características representativas, a partir dos registros históricos disponibilizados pelas estações pluviométricas do INMET e pelos dados monitorados pelas estações pluviométricas e linimétricas da Prefeitura de Belo Horizonte, acessados via sistema BHMap (Prodabel, 2025?).

Esses conjuntos de dados permitiram a avaliação do comportamento hidrológico da bacia tanto sob condições médias, derivadas da variabilidade histórica, quanto sob cenários críticos simulados, que contemplam eventos de alta intensidade e baixa frequência de ocorrência.

4.4.1 Precipitações de projeto

Para a estimativa das chuvas de projeto utilizadas na modelagem, aplicou-se a equação intensidade-duração-frequência (IDF) ajustada para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, conforme a metodologia proposta por Pinheiro e Naghettini (1998). Essa abordagem permitiu o cálculo de precipitações associadas a diferentes períodos de retorno, com base em parâmetros regionalizados previamente definidos para a área de estudo. Conforme especificado na Equação 4-1.

$$\hat{I}_{T,d,j} = 0,76542d^{-0,7059}P_j^{0,5360}\mu_{T,d} \quad (4-1)$$

Em que:

- $\hat{I}_{T,d,j}$ = intensidade de precipitação média de duração d, do local j e associada ao período de retorno T (mm/h);
- d = duração da precipitação (h);
- P_j = precipitação total anual média do local j (mm);
- $\mu_{T,d}$ = quantil adimensional regional tabelado.

A precipitação total anual média considerada foi de 1400 mm, conforme mapa de isoietas disponível em Pinheiro e Naghettini (1998).

Foram selecionados os períodos de retorno (TR) de 2, 10 e 100 anos e durações de 10, 15, 30 e 45 minutos e 1 e 2 horas, em função da duração crítica da bacia avaliada em 60 minutos por Moraes (2022) e em 45 minutos por Nunes et al. (2023). Calcularam-se a intensidade para essas combinações de TR e duração e a altura total de chuva associada. Para as durações de 10, 15,

30 e 45 minutos, utilizou-se um intervalo de discretização de 5 minutos, enquanto para as durações de 1 e 2 horas, esse valor foi de 10 minutos.

Para a definição das distribuições temporais das chuvas de projeto, adotou-se a curva de distribuição temporal com probabilidade de 50%, conforme proposta por Pinheiro e Naghettini (1998), aplicada a diferentes faixas de duração. Essa curva permitiu calcular a porcentagem de precipitação acumulada em função da fração da duração total do evento, possibilitando, a partir desses percentuais, a construção das chuvas acumuladas e incrementais para cada combinação de duração e período de retorno (TR).

Com esses dados, foram elaborados os hietogramas de projeto, os quais foram inseridos como séries temporais (Time Series) no ambiente SWMM e vinculados ao pluviômetro (Rain Gage) do modelo previamente estabelecido por Cândido (2015). No total, foram geradas 18 séries temporais, correspondentes às combinações de três períodos de retorno e seis durações de precipitação.

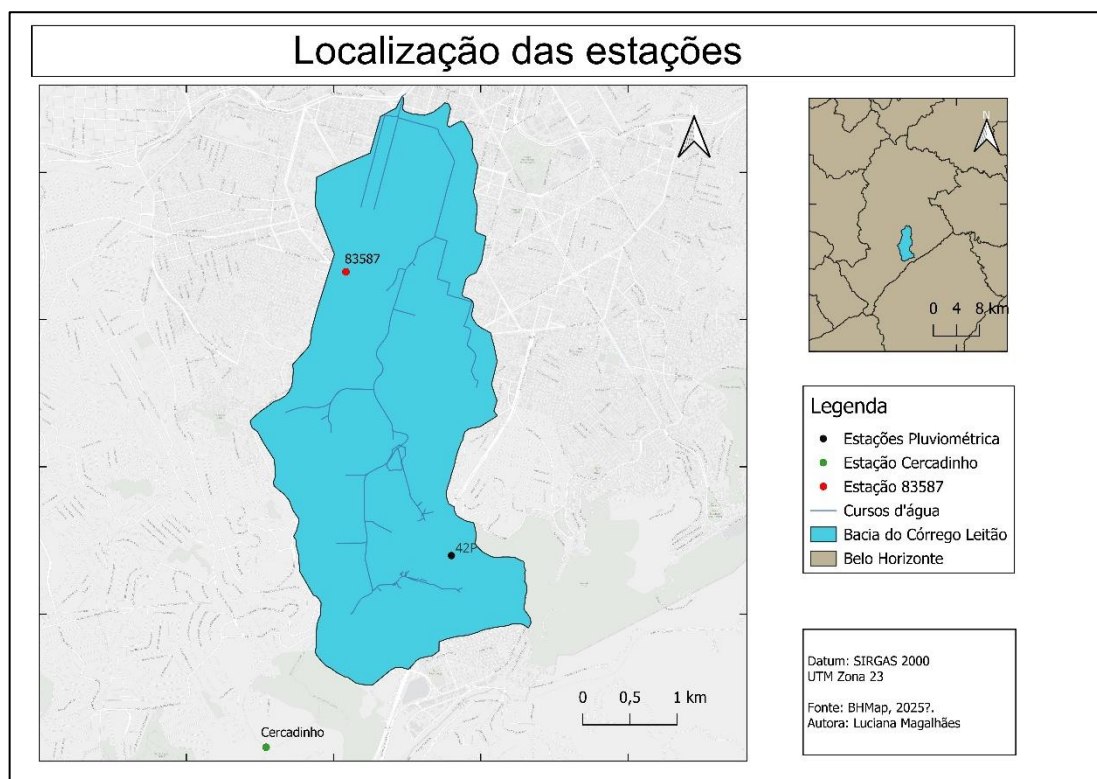
Cada uma dessas séries foi utilizada para executar simulações no SWMM, resultando na geração dos respectivos hidrogramas no exutório da bacia. Com isso, foi possível identificar as durações críticas, definidas em aquelas que produziram os maiores picos de vazão para cada TR. As chuvas associadas a essas durações críticas foram, então, utilizadas para fundamentar a simulação das enchentes.

4.4.2 Evento observado

Os dados de monitoramento hidrológico utilizados neste trabalho compreenderam séries históricas de precipitação e níveis d'água nos canais disponibilizadas pela PBH, referentes ao período de janeiro de 2011 a dezembro de 2019. Esses registros, discretizados em intervalos de 10 minutos, foram empregados principalmente para analisar e comparar os resultados das simulações hidrológicas realizadas no modelo SWMM, permitindo avaliar a coerência das vazões e dos hidrogramas simulados em relação às condições observadas na bacia do córrego do Leitão. Dentre os dados disponíveis, foi selecionado o ano de 2017 para as simulações, por apresentar ocorrência de eventos extremos documentados e ser o período com maior densidade de registros consistentes dentro da série histórica, apesar da presença de diversas falhas e dados faltantes.

Para a alimentação do modelo com dados pluviométricos adicionais, também foram incorporados os registros da estação convencional do INMET localizada na área de estudo (Figura 4-2). Especificamente, foram utilizadas as séries da estação Belo Horizonte – MG (OMM 83587), no período de janeiro de 2000 a janeiro de 2025, e da estação Cercadinho (OMM F501), no período de janeiro de 2014 a janeiro de 2024. No caso da estação Cercadinho, optou-se por empregar dados discretizados em intervalos horários (1h), considerando a disponibilidade e a confiabilidade dos registros nesse formato. Para as simulações no SWMM com base nos dados do INMET, foi escolhido o ano de 2020, por conter registros contínuos, sem lacunas, e apresentar episódios de precipitação intensa adequados à análise do comportamento hidrológico da bacia sob cenários com volumes pluviométricos consideráveis para ocasionar uma vulnerabilidade infraestrutural do canal. Além disso, nesse mesmo ano, reportagens publicadas em veículos de comunicação de Belo Horizonte documentaram ocorrências de alagamentos no canal do Córrego do Leitão.

Figura 4-2 - Localização das estações de monitoramento hidrológico na bacia do córrego do Leitão.



Fonte: Autoria própria (2025).

Desse modo, os dados provenientes dessas estações foram utilizados com diferentes finalidades na pesquisa: enquanto os registros horários da estação Cercadinho alimentaram o modelo hidrológico, as séries completas de longo prazo das duas estações serviram de base para a análise de tendências nas séries de eventos extremos de precipitação.

Para a avaliação das variações e tendências da precipitação extrema ao longo do tempo, foi realizada uma análise estatística das séries temporais anuais de índices climáticos de precipitação, conforme a definição proposta pelo Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI). Nessa etapa, foram calculados diversos indicadores que caracterizam diferentes aspectos do regime pluviométrico, incluindo frequência, intensidade e volume acumulado das chuvas, tais como número anual de dias chuvosos consecutivos e secos consecutivos (CWD e CDD), intensidade diária média de precipitação (SDII), número de dias com precipitação acima de limiares específicos (R10, R20, R30 e R40) e índices de eventos extremos (Rx1day, Rx5day, R95p, R99p e PrcpTot). Os dados foram processados entre os anos de 2014 e 2024 (Estação Cercadinho) e 2020 e 2025 (Estação 83587), permitindo a identificação de padrões interanuais e a detecção de tendências que auxiliaram na interpretação do comportamento das chuvas na área de estudo.

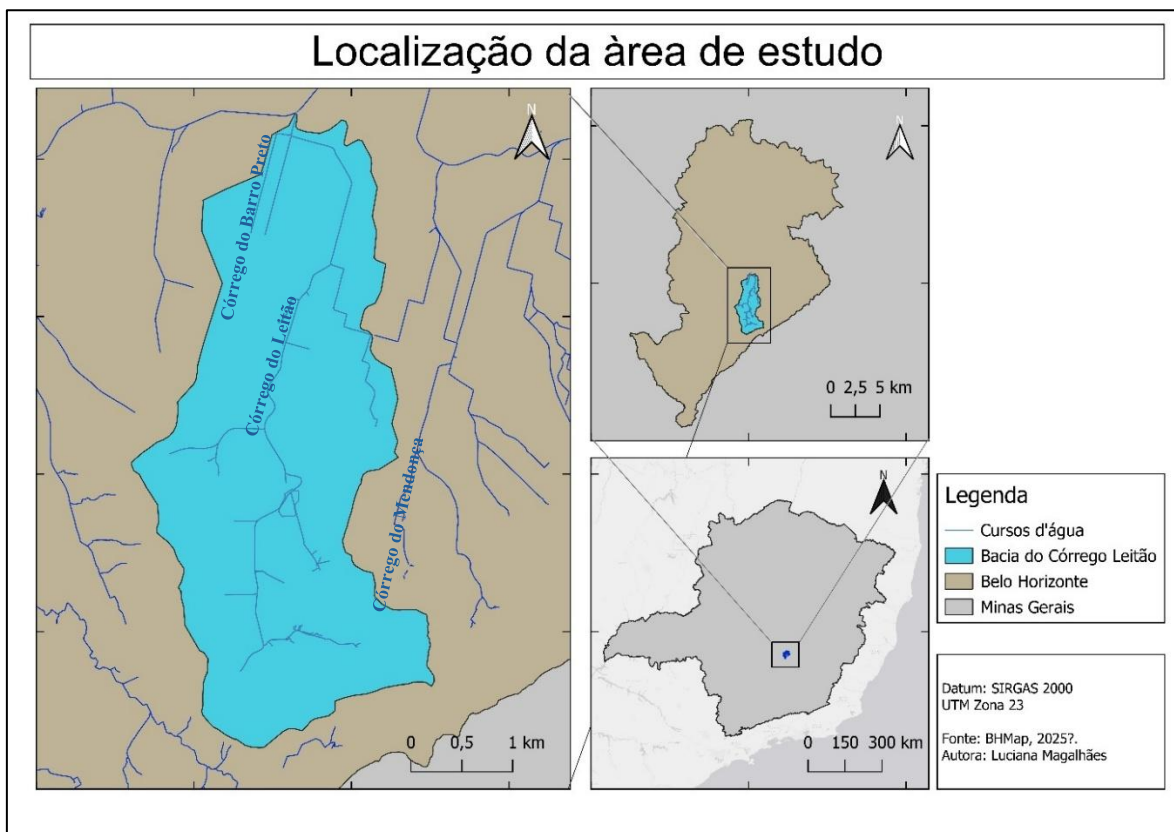
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados obtidos a partir das simulações realizadas para os diferentes cenários de eventos extremos de precipitação, a discutir os principais aspectos observados. São detalhados os comportamentos hidrológicos simulados, considerando a realidade física da bacia do córrego do Leitão.

5.1 Caracterização física da bacia em estudo

O município de Belo Horizonte abrange uma área de 331,35 km² e possui uma população de 2.315.560 habitantes (IBGE, 2022). A sub-bacia localizada nas Regionais Centro-Sul e Hipercentro do município, incluindo desde a nascente, no bairro Santa Lúcia, até a foz no Ribeirão Arrudas e está inserida na Bacia do Ribeirão Arrudas (PBH, 2022a). Na Figura 5-1 é apresentado o mapa de localização da Bacia do Córrego Ressaca, obtido a partir do BHMap (Prodabel, 2025?)

Figura 5-1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os principais afluentes são o Córrego Santa Maria, que desemboca no Leitão na altura da Barragem Santa Lúcia e o Córrego do Mendonça, cuja nascente localiza-se nas encostas do Morro do Papagaio e que hoje corre canalizado por ruas dos bairros Santa Lúcia, Savassi e Lourdes, até desaguar no Leitão nas imediações da Rua São Paulo com Avenida Alvarenga Peixoto (Borsagli, 2011). Praticamente todos os tributários do Leitão encontram-se canalizados e fechados pelo sistema de drenagem urbano com exceção de um pequeno curso d'água a montante, na porção sudeste da bacia (Reis, 2011).

No início dos anos 2000, a PBH desenvolveu estudos de modelagem hidrológica e hidráulica abrangendo as principais bacias urbanas da cidade, incluindo a bacia do Córrego do Leitão. Esses estudos, realizados no âmbito do Plano Diretor de Drenagem Urbana e do programa DRENURBS, tinham como objetivo simular o comportamento das vazões e identificar áreas sujeitas a enchentes (PBH, 2018).

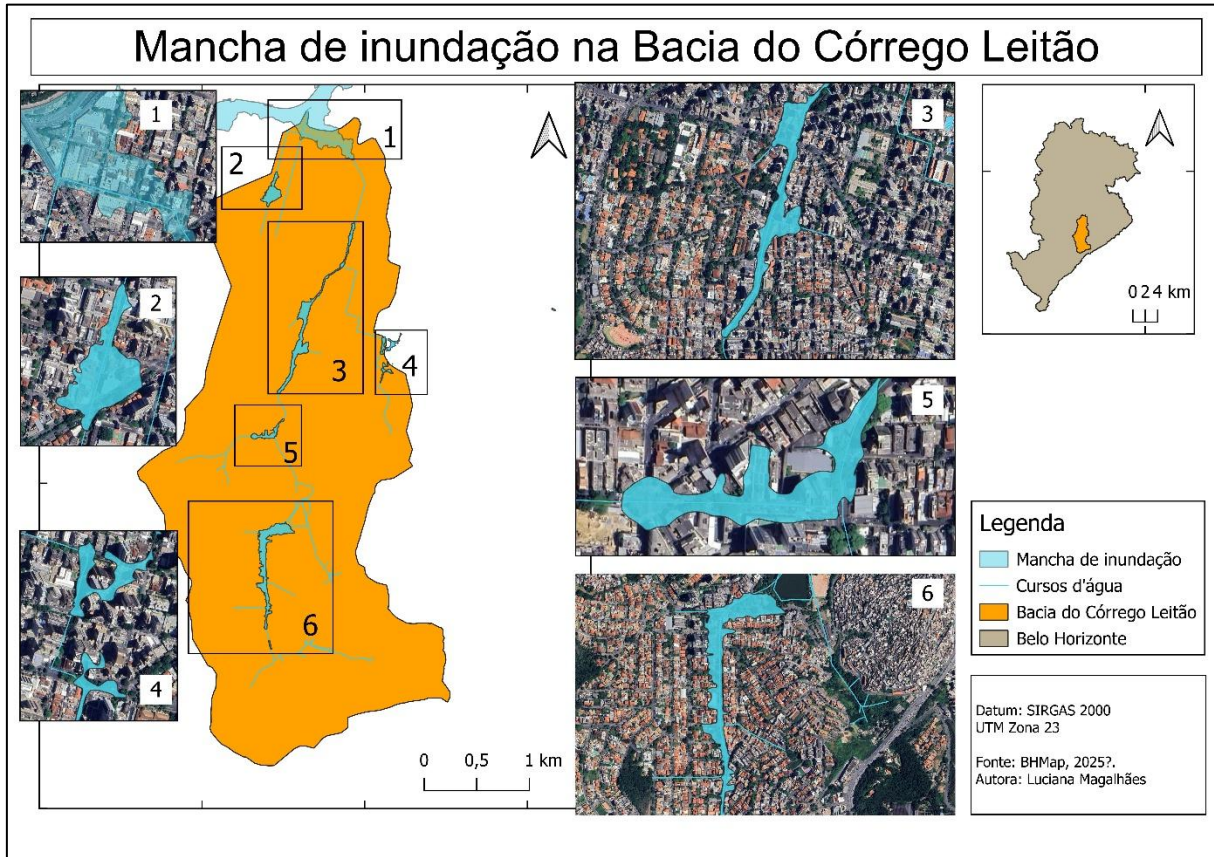
Devido aos recorrentes casos de alagamentos e inundações durante épocas chuvosas, o Córrego do Leitão foi alvo de diversas intervenções conduzidas pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Dentre elas, destacam-se as ações de desassoreamento da Barragem Santa Lúcia, executadas em 2013, com a retirada de aproximadamente 15.000 m³ de sedimentos, e novamente em 2018, quando foram removidos entre 10.000 e 15.000 m³, com o objetivo de restaurar a capacidade de amortecimento de cheias do reservatório (PBH, 2023).

Em resposta aos alagamentos registrados em eventos extremos, por exemplo o de janeiro de 2020, responsável por danos significativos na Rua Marília de Dirceu e na Avenida Prudente de Moraes, a Prefeitura contratou, ainda em 2020, estudos para diagnóstico, avaliação de alternativas e elaboração de anteprojeto de engenharia com foco na mitigação das inundações na bacia do Leitão. Posteriormente, em 2023, foi iniciada a elaboração do projeto executivo de saneamento ambiental integrado, abrangendo soluções estruturais de ampliação de galerias, reforço da capacidade de retenção de cheias e intervenções complementares de drenagem urbana (PBH, 2020a; 2023b).

Além de possuir áreas historicamente suscetíveis a inundações, conforme evidenciado pelas Cartas de Inundação de Belo Horizonte (PBH, 2019), a bacia do Córrego do Leitão figura entre os principais pontos críticos de alagamento do município, com destaque para os trechos das avenidas Prudente de Moraes, do entorno da Barragem Santa Lúcia e das ruas Joaquim Murtinho

e Marília de Dirceu (PBH, 2020a). A Figura 5-2 apresenta as áreas de risco de inundação na bacia.

Figura 5-2 - Áreas de risco de inundação.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2 Análise do uso e ocupação do solo

Segundo estudo realizado por Borsagli (2011), já era perceptível, à época, um processo de intensificação da verticalização nos bairros situados na bacia do córrego do Leitão, especialmente nos bairros Santo Antônio, Luxemburgo e Vila Paris. O autor destaca que, embora esse processo tenha se iniciado cerca de trinta anos antes, a partir de 2011 observou-se um avanço mais acentuado, evidenciado pelo aumento das demolições de residências unifamiliares. Esse fenômeno foi interpretado em uma nova fase de transformação do espaço urbano, caracterizada pela substituição de construções horizontais por edificações verticais, resultando no aumento da densidade construtiva e populacional da região.

A camada “Tipologia de Uso e Ocupação do Lote – 2022” foi obtida no portal BHMap (Prodabel, 2025?), da Prefeitura de Belo Horizonte, que disponibiliza os dados cadastrais de todos os lotes do município em formato vetorial. O arquivo foi importado para o QGIS 3.44.11 e reprojetado para o sistema SIRGAS 2000 / UTM 23S (EPSG 31983), o mesmo adotado para a delimitação da bacia do córrego Leitão, a fim de assegurar a coerência métrica entre camadas.

Dessa forma, o processamento evidenciou que o uso residencial constitui o padrão predominante: 6.057 lotes que perfazem 451,38 ha, correspondendo a 42,56 % da área da bacia. Em segundo lugar, aparecem os lotes sem informação cadastral (3.824 registros; 284,97 ha; 26,87 %), seguidos pelos usos não residenciais (2.162 registros; 161,10 ha; 15,19 %). As categorias lote vago e misto somam conjuntamente 15,18 % da superfície, enquanto a classe parque ocupa 2,12 ha, apenas 0,20 % do total. As áreas das tipologias de uso e ocupação do solo e suas respectivas porcentagens da área total estão apresentadas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1- Áreas e porcentagens das tipologias de uso e ocupação do solo.

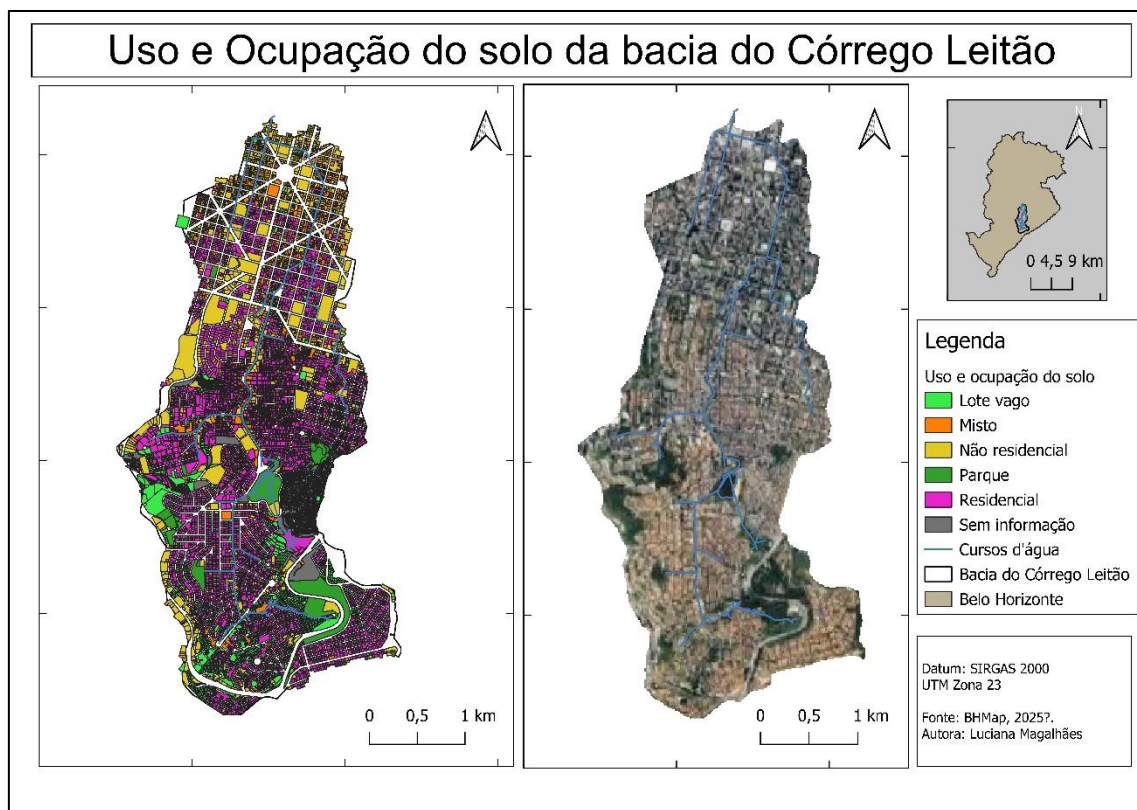
Categoria	Nº de lotes	Área (ha)	% da bacia
Residencial	6.057	451,38	42,56
Sem informação	3.824	284,97	26,87
Não residencial	2.162	161,10	15,19
Lote vago	1.579	117,62	11,09
Misto	582	43,38	4,09
Parque	29	2,12	0,20
Total	14.233	1.060,56	100 %

Fonte: Autoria própria (2025).

As categorias de uso misto compreendem construções, a exemplo casas ou sobrados com função residencial e comercial simultâneas, edifícios de uso diversificado e galpões voltados ao

comércio. Por sua vez, a classificação “não residencial” abrange diferentes tipologias edificadas destinadas a atividades não domésticas, incluindo imóveis residenciais adaptados para fins comerciais, estabelecimentos de ensino, templos religiosos, casas de espetáculo, estacionamentos, clubes esportivos ou sociais, unidades hospitalares, hospedarias, supermercados e o aterro sanitário municipal (PBH, 2022b). A Figura 5-3 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica em questão, obtido a partir do Google Satellite e BHMap (Prodabel, 2025?).

Figura 5-3 - Uso e ocupação do solo da Bacia do Córrego Leitão.



Fonte: Autoria própria (2025).

Localizando-se também na bacia do Córrego Leitão, a Barragem Santa Lúcia, a montante da Avenida Prudente de Moraes, foi construída na década de 1970 com a finalidade de atenuar os picos de cheia no córrego Leitão (Borsagli, 2011). O reservatório ocupa, atualmente, 3,08 hectares e possui um espelho d'água permanente na altitude de 900,65 m, com um volume morto de 42.710 m³ (Rosa, 2017).

5.3 Estudo do Plano Diretor, zoneamento e taxa de permeabilidade

O Plano Diretor de Belo Horizonte, aprovado pela Lei Municipal nº 11.181/2019, configura-se no principal instrumento de gestão da política urbana da capital mineira. O texto normativo apresenta diretrizes para o desenvolvimento do território e estabelece regras de ordenamento que abrangem questões ambientais, preservação do patrimônio histórico-cultural, mobilidade, habitação de interesse social e manejo dos espaços públicos e privados (PBH, 2020b; 2024).

A bacia do Córrego do Leitão abrange áreas classificadas em Áreas de Diretrizes Especiais (ADE) no Plano Diretor de Belo Horizonte (Lei nº 11.181/2019), devido à relevância ambiental, paisagística e cultural dessas porções do território. Entre as ADEs presentes na bacia, destacam-se a ADE Barragem Santa Lúcia e a ADE Cidade Jardim, ambas com diretrizes específicas para o uso e ocupação do solo (Belo Horizonte, 2019).

Outrossim, os bairros residenciais, como Santa Lúcia, São Bento, Cidade Jardim e Santo Antônio, encontra-se inserida em zonas urbanas classificadas pelo Plano Diretor de Belo Horizonte como de ocupação moderada. Nessas zonas, os parâmetros urbanísticos foram definidos com o objetivo de preservar a ambiência local e restringir o adensamento construtivo em áreas que apresentam vulnerabilidade à ocorrência de inundações (Belo Horizonte, 2019).

Para isso, o Plano impõe taxas mínimas de permeabilidade que, em muitos casos, correspondem a 30% da área do lote, a fim de assegurar a existência de áreas livres e vegetadas que favoreçam a infiltração de águas pluviais. Como exemplo, destaca-se o bairro Santa Lúcia, cuja maior parte da área está sujeita à exigência de taxa permeável mínima de 30%, refletindo a atenção dada à drenagem urbana nas encostas e nos fundos de vale da região, em conformidade com os princípios de resiliência hídrica adotados pelo município (Belo Horizonte, 2019).

Nas áreas mais centrais e adensadas da bacia do córrego do Leitão, classificadas como zonas de ocupação preferencial, o Plano Diretor permite maior adensamento construtivo, mas exige taxas mínimas de permeabilidade, inclusive em lotes pequenos. Mesmo em regiões de uso intensivo, parte do solo deve permanecer vegetada, com o objetivo de reduzir o escoamento superficial e minimizar o risco de inundações.

Vale ressaltar que o Plano Diretor de Belo Horizonte (Lei 11.181/2019) estabelece um arcabouço normativo para a bacia do Córrego do Leitão, combinando zoneamento, áreas

especiais de proteção, índices urbanísticos sustentáveis e diretrizes específicas de drenagem. As regras em vigor buscam conciliar o desenvolvimento urbano com a preservação ambiental e a segurança contra inundações, impondo permeabilidade mínima elevada, controle de ocupação nos fundos de vale, estímulo à renaturalização dos cursos d'água e restrições a empreendimentos que possam agravar os riscos. Entre os dispositivos obrigatórios, destaca-se a caixa de captação (microrreservatório em lotes), cuja construção é exigida pela Lei nº 11.181:

§ 8º: “A caixa de captação constitui dispositivo complementar à TP, com função de amortecimento da descarga de água pluvial na rede pública de drenagem, bem como de melhoria do funcionamento do sistema de micro e macrodrenagem, sendo objeto de exigência conforme disposto em regulamento.”

§ 9º: “A instalação da caixa de captação deve garantir que o lançamento de águas pluviais de um terreno edificado na rede pública de drenagem seja equivalente à sua vazão em condições naturais.”

Essas exigências implicam que, em cada lote edificável, deve ser previsto um reservatório temporário capaz de deter parcialmente o escoamento superficial, liberando-o gradualmente para a rede viária somente na vazão correspondente ao fluxo que ocorreria sem alterações na permeabilidade original do solo. Dessa forma, a implantação de caixas de captação assegura não apenas o controle de picos de cheia nos canais e galerias urbanas, mas também contribui para a renaturalização parcial do regime hídrico local, reduzindo a impermeabilização efetiva e reforçando a segurança de empreendimentos situados em fundos de vale ou áreas suscetíveis a inundação.

5.4 Caracterização da geologia, hidrogeologia, pedologia e geomorfologia

Em termos geológicos, a bacia do Córrego Leitão está inserida na “Unidade Geológica do Complexo Belo Horizonte correspondente ao Domínio geomorfológico da Depressão de Belo Horizonte”. Com essa denominação, predominam formações rochosas gnáissicas de idade arqueana, as quais passaram por processos de remobilização e migmatização³ durante o Paleoproterozoico (Reis, 2011).

³ Transformações sofridas pelas rochas da fácies graníticas (Wernick; Penalva, 1974).

Essas unidades geológicas ocupam aproximadamente 70% da área do município, com maior representatividade ao norte do leito do ribeirão Arrudas. A principal litologia associada a essas formações é um gnaiss de coloração cinza, com bandamento composicional evidente e estruturas migmatíticas, conhecido localmente como Gnaiss Belo Horizonte. De modo geral, essas rochas encontram-se intensamente alteradas ou saprolitizadas, sendo frequentemente recobertas por uma camada de intemperismo composta por materiais siltico-argilosos de tonalidade entre rosa-claro e avermelhado. Em algumas áreas elevadas ou em fundos de vale, é possível observar afloramentos de rocha sã, formando lajedos expostos (Reis, 2011).

O aquífero associado ao Complexo Belo Horizonte apresenta caráter livre e é constituído por dois compartimentos hidráulicamente conectados: um nível superior, composto por material poroso granular, e uma porção inferior representada por rochas fraturadas, que atuam como meio fissurado (Sousa, 1998).

De acordo com os dados obtidos por Costa (2002), o nível freático na região geralmente se encontra a profundidades superior a cinco metros. A condutividade hidráulica do solo é da ordem de 10^{-7} m/s (Costa, 2002).

Por meio de levantamento de campo e medições, utilizando-se de cerca de 300 poços de monitoramento distribuídos em Belo Horizonte, Costa (2002) classificou os solos do município como Podzólico Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Litólico.

Quanto à pedologia, a bacia é composta por Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, Argissolos Vermelhos Eutróficos e Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos (EMBRAPA, 2011).

De acordo com Rosa, (2017) a bacia do córrego do Leitão está distribuída, do baixo curso para o alto curso da bacia, entre: Complexo Belo Horizonte (28% da área da bacia); Grupo Sabará (54%); Formação Cercadinho (11%); e Formação Gandarela (6%).

Por fim, na Depressão de Belo Horizonte predominam as colinas de topos planos a arqueados, com encostas côncavo-convexas e altitudes entre 800 - 900 m, formadas pela dissecação fluvial das áreas gnáissicas promovida pela rede de drenagem dos rios das Velhas e Paraopeba (Reis, 2011).

Uma proposta simplificada para a classificação dos solos de Belo Horizonte quanto aos grupos hidrológicos foi apresentada por Ramos (1998), a partir da localização da bacia em relação à calha do ribeirão Arrudas: os solos situados ao norte seriam enquadrados no grupo B, enquanto aqueles ao sul pertencem ao grupo D. Com base nesse critério, a bacia do córrego do Leitão, por estar posicionada ao sul do Arrudas, seria integralmente classificada como pertencente ao grupo hidrológico D. No entanto, parte da área da bacia encontra-se sobre unidades geológicas no Complexo Belo Horizonte e a Formação Gandarela, cujos solos apresentam condutividades hidráulicas superiores às típicas dos solos característicos do grupo D, o que pode indicar limitações na aplicação direta dessa classificação generalizada (Ramos, 1988 apud Rosa, 2017). Na Tabela 5-2 é apresentada as classes do solo e a porcentagem (%) de uso do solo que se refere apenas às áreas da bacia.

Tabela 5-2 - Classes do solo no Córrego do Leitão.

Classe de Solo	Grupo Hidrológico do Solo	% de Uso do Solo		
		Vegetação arbórea	Campo	Solo e pastagem
		47%	49%	5%
Argissolo VA	A	45	30	72
Latossolo VA	C	77	71	88
Neossolo Litólico	D	83	78	97

Fonte: Rosa (2017).

Neste trabalho, foi utilizado o parâmetro Curve Number (CN) disponibilizado pelo sistema BHMap (Prodabel, 2025?), plataforma cartográfica oficial da Prefeitura de Belo Horizonte, como base para a caracterização hidrológica da área de estudo. Os valores de CN utilizados têm como referência a metodologia desenvolvida pela Prefeitura de Belo Horizonte (2022), que revisou esses parâmetros em decorrência das modificações promovidas pela nova Lei de Uso e Ocupação do Solo de 2019 e do intenso adensamento urbano observado na cidade. A atualização foi embasada em estudos realizados pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por meio da Fundação Christiano Ottoni, e empregou ferramentas computacionais

modernas para adequar os parâmetros hidrológicos às condições físicas e legais vigentes (PBH, 2022).

A metodologia adotada para a determinação dos valores de CN considerou a sobreposição de dados espaciais relacionados ao tipo e à cobertura do solo, conforme descrito pela Prefeitura de Belo Horizonte (2022). A classificação dos solos foi realizada segundo os grupos hidrológicos A, B, C e D, conforme os critérios do método NRCS, com base em propriedades físico-hídricas como a capacidade de infiltração. Para isso, foram utilizadas informações detalhadas de litoestratigrafia e dados de condutividade hidráulica obtidos a partir da análise de aproximadamente 300 poços subterrâneos espalhados pelo município. A partir dessa análise, os solos foram agrupados em três principais categorias: grupo B (ao norte do Ribeirão Arrudas e em parte da área central), grupo C (ao sul da calha) e grupo A (em faixas da encosta da Serra do Curral), conforme metodologia proposta pela PBH (2022).

A definição da cobertura do solo utilizada nesta pesquisa baseia-se na classificação elaborada pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2022a), a partir de imagens aéreas com resolução espacial de 0,5 metro, obtidas em 2013. Essas imagens foram classificadas em diversas categorias, são exemplos asfalto, concreto, telhados (colonial e metálico), solo exposto, vegetação e corpos hídricos. A própria metodologia da PBH incluiu um refinamento dessa classificação por meio da sobreposição de camadas vetoriais com as edificações e o sistema viário existentes, visando corrigir possíveis inconsistências e garantir maior acurácia na definição das classes de uso do solo.

Ao final desse trabalho técnico, conduzido pela equipe da Prefeitura, foram calculados os valores médios de CN para cada lote, quadra e sub-bacia hidrográfica de Belo Horizonte, com o objetivo de apoiar a elaboração de estudos e projetos de drenagem urbana. Esses dados consolidados, produzidos integralmente pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2022), estão disponíveis para consulta pública na plataforma cartográfica oficial do município, o BHMap (Prodabel, 2025?). A Tabela 5-3 apresenta os valores CN disponibilizado pelo sistema BHMap (Prodabel, 2025?).

Tabela 5-3 - Valores do coeficiente CN para o cenário de 2021.

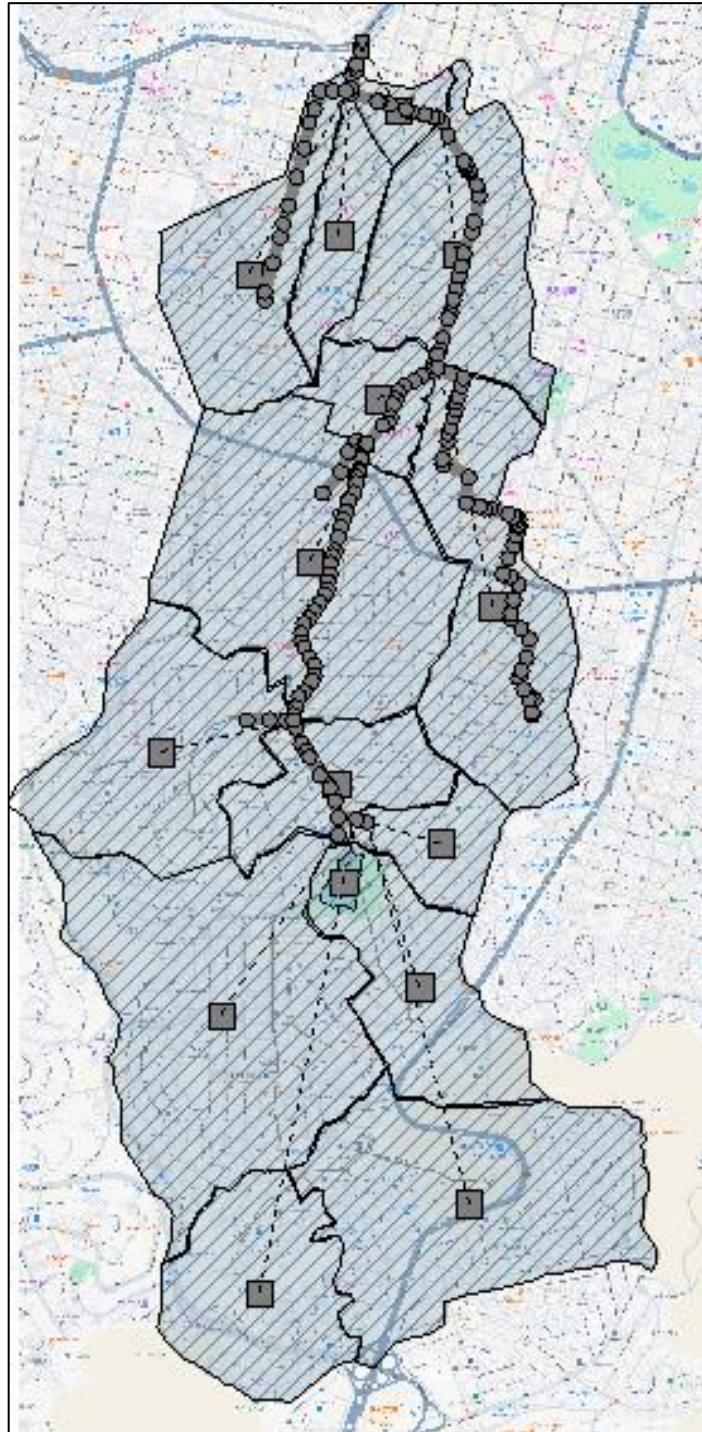
Área	CN
Barro Preto	90,79
Belvedere	77,18
Centro 1	92,51
Centro 2	95,28
Cidade Jardim	89,219
Lourdes	90,64
Luxemburgo	86,54
Santa Lúcia	77,17
Santo Agostinho	92,01
Santo Antônio	90,12
São Bento	88,34
Vila Paris	89,09
Vila Santa Lúcia 1	87,67
Vila Santa Lúcia 2	86,15

Fonte: Autoria própria (2025).

5.5 Parâmetros característicos das sub-bacias para modelagem dos fenômenos hidrológicos

O modelo construído para a bacia do Córrego leitão constituiu-se de 15 sub-bacias, 158 nós, sendo um destes o exutório, 176 condutos e 1 pluviômetro. A Figura 5-4 apresenta uma captura de tela da bacia modelada no SWMM, extraída diretamente da janela “Mapa da Área de Estudo”, onde é possível visualizar a divisão em sub-bacias, os elementos da rede de drenagem e a configuração espacial do sistema simulado.

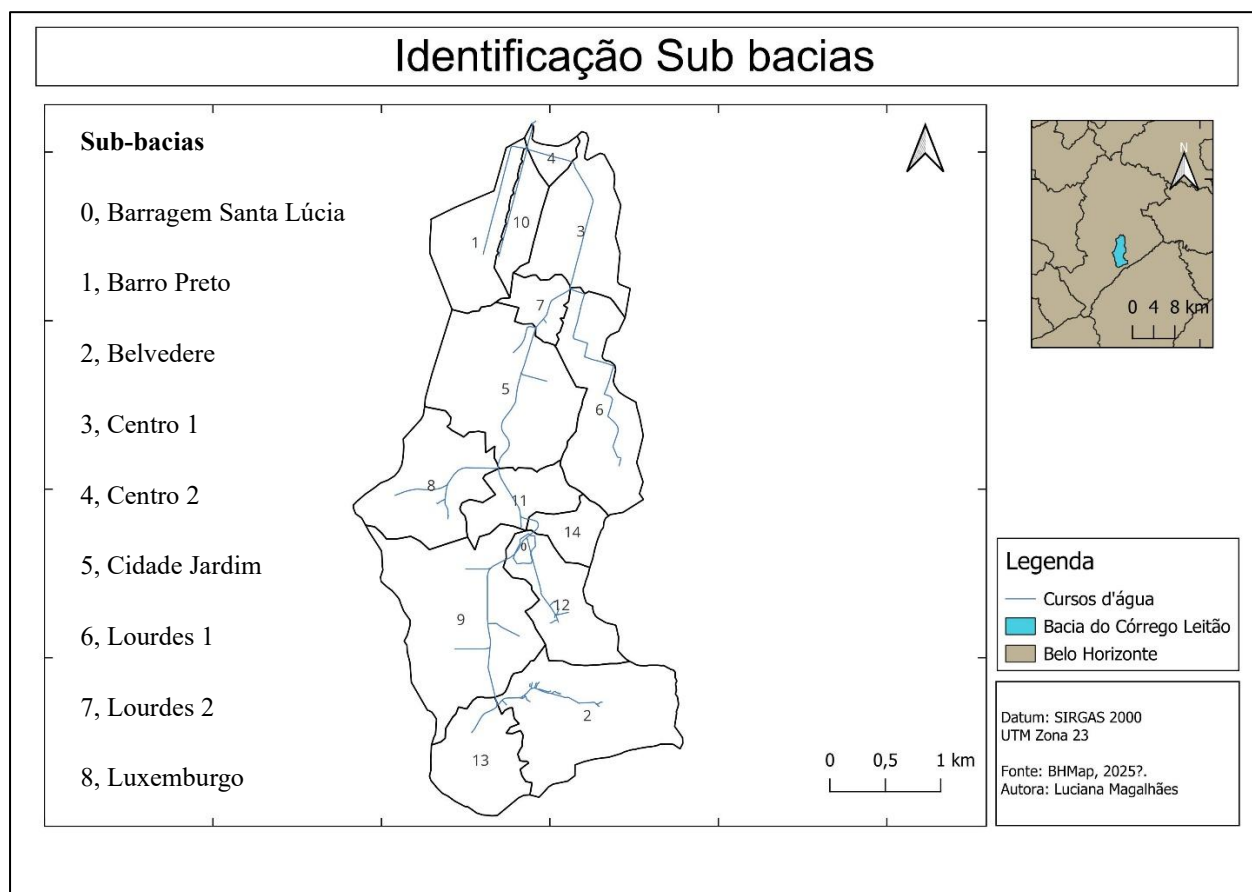
Figura 5-4 - Construção do modelo hidrológico da bacia do Córrego Leitão no SWMM.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para representar os processos de geração e escoamento superficial nas 15 sub-bacias definidas para a bacia do córrego Leitão neste estudo (Figura 5-5), foram adotados os valores calibrados por Rosa (2017) para todos os parâmetros hidrológicos, exceto o Curve Number (CN).

Figura 5-5 - Divisão das sub-bacias.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para compatibilizar os parâmetros entre os dois modelos, adotou-se o procedimento de média entre os valores das sub-bacias correspondentes no estudo de Rosa (2017) apresentados na Tabela 5-4 - Parâmetros calibrados.

Tabela 5-4 - Parâmetros calibrados.

Sub-bacias	Ai (%)	W (m)	S (%)	Ni	Np	Si (mm)	Sp (mm)	CN
0	0	312	2,26	0,012	0,01	4,2	10,3	27
1	99,83	13087	13,67	0,012	0,090	0,90	6,00	90.79
2	41,6	1440	26,56	0,012	0,024	4,2	10,3	77.18
3	86,55	20800	14,59	0,012	0,091	2	8,5	92.52
4	100	8960	9,29	0,012	0,08	0,9	6	95.28
5	63,22	3360	18,395	0,016	0,091	3,05	8,5	89.22
6	68,05	5520	19,225	0,012	0,096	3,1	11	90.12
7	72,3	3280	11,22	0,012	0,101	3,1	11	90.64
8	67,5	958	35,27	0,012	0,027	4,8	8,8	89.22
9	43,9	1032	36,34	0,012	0,021	4,2	10,3	77.17
10	50,78	1584	26,57	0,012	0,0238	4,45	10,8	88.34
11	99,6	12480	14,25	0,012	0,091	0,9	6	92.01
12	55,55	90	25,6	0,02	0,136	3	6	89.09
13	28	69	32,56	0,02	0,11	3	6	80
14	46,5	68	35,03	0,02	0,14	3	6	87.67
Média	61,56	4869,33	21,39	0,01	0,08	2,99	8,37	53,50

Fonte: Autoria própria (2025).

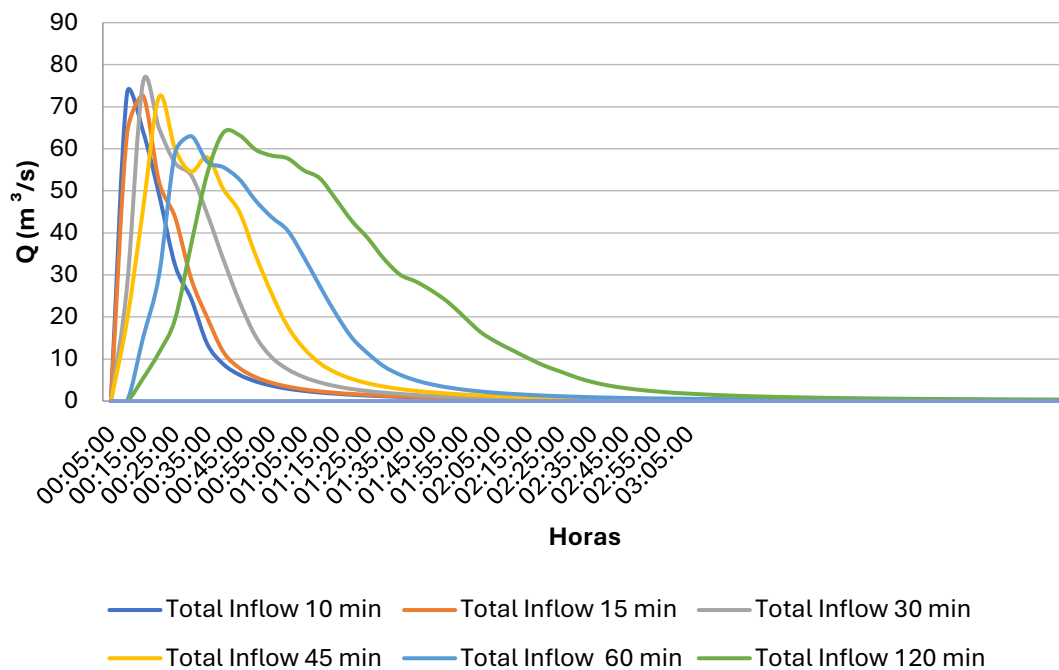
Foram considerados os seguintes parâmetros calibrados: percentual de área impermeável (Ai), largura característica do escoamento superficial (W), declividade média (%S), coeficientes de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis (Ni) e permeáveis (Np), profundidade de armazenamento em depressões para áreas impermeáveis (Si) e permeáveis (Sp). Esses valores foram obtidos por Rosa (2017) por meio de calibração multievento, que apresentou bom

desempenho (coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe médio em torno de 0,73), e confere confiabilidade à sua utilização como referência neste trabalho.

5.6 Duração crítica das chuvas de projeto

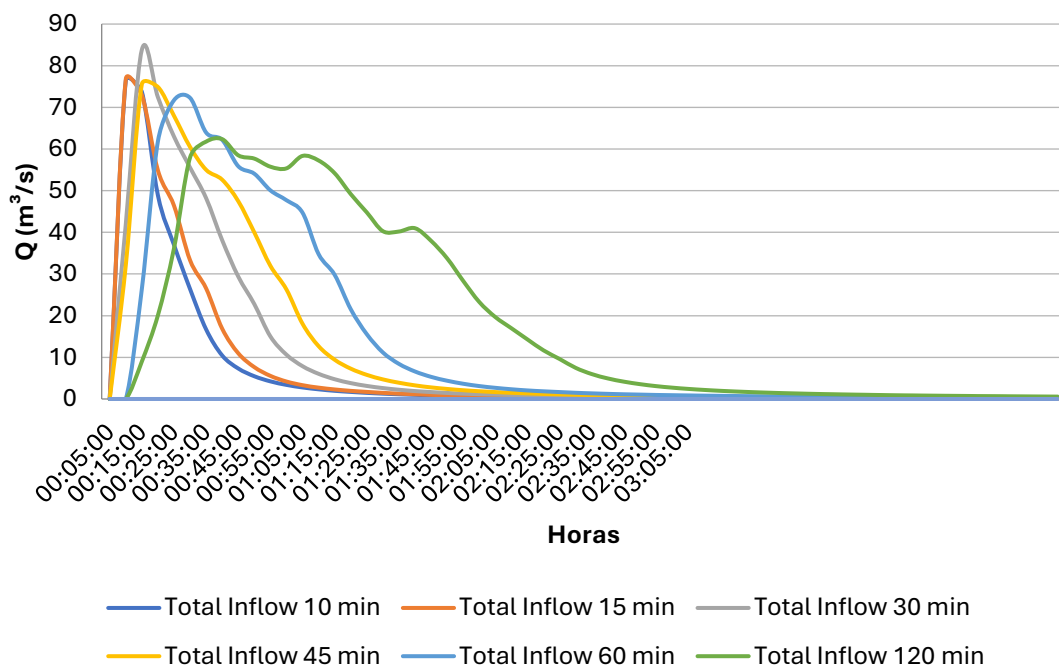
Após a realização das simulações das chuvas de projeto no SWMM, as vazões de pico foram extraídas diretamente do nó correspondente ao exutório do modelo. Para a determinação das durações críticas das chuvas a serem utilizadas no modelo, por meio da tabela de resultados da simulação, assim os hidrogramas foram plotados. A Figura 5-6, a Figura 5-7 e a Figura 5-8 apresentam os hidrogramas para as diferentes durações, para os TRs de 2, 10 e 100 anos, respectivamente.

Figura 5-6 - Hidrogramas - TR 2 anos.



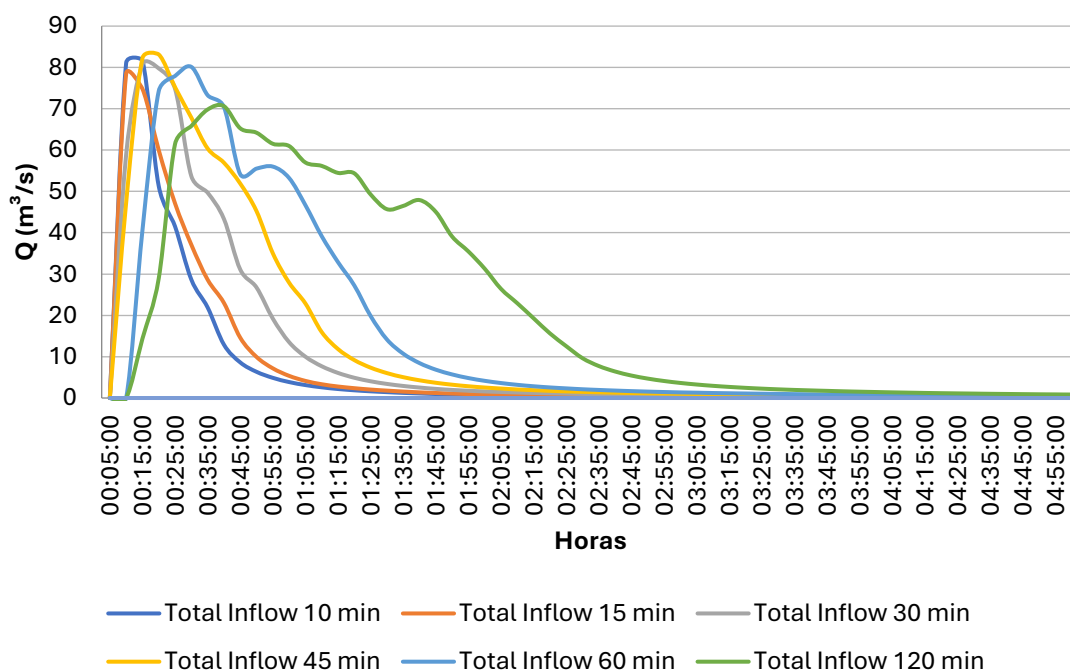
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-7 - Hidrogramas - TR 10 anos.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-8 - Hidrogramas - TR 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em todos os cenários, observa-se o mesmo padrão hidrológico geral, caracterizado por uma relação inversa entre a duração da chuva e a intensidade do pico de vazão.

As chuvas de curta duração (10, 15 e 30 minutos) geraram respostas hidrológicas mais intensas e concentradas no tempo, com picos que superam $80 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorrem entre 15 e 30 minutos após o início da precipitação. Esses eventos breves resultam em declínios acentuados na vazão logo após o pico, comportamento típico de escoamento superficial rápido em áreas urbanizadas.

Para as durações intermediárias (45 e 60 minutos), observa-se uma atenuação dos picos e maior dispersão temporal do escoamento. O pico de vazão ocorre de forma mais tardia, geralmente entre 30 e 50 minutos após o início da chuva, acompanhado de declínio mais gradual ao longo do tempo.

Já nos eventos de maior duração (120 minutos), a diluição do pico torna-se mais evidente, deslocando o instante de máxima descarga para aproximadamente 1 hora após o início da precipitação. Ainda assim, mantêm-se vazões significativas por um período prolongado, o que sugere potencial de saturação do solo e sobrecarga prolongada da rede de drenagem.

Comparando os diferentes períodos de retorno, verifica-se que os hidrogramas associados ao TR de 100 anos apresentaram picos ligeiramente mais altos e vazões mais elevadas, evidenciando o aumento da severidade hidrológica. No entanto, o comportamento relativo entre as diferentes durações se manteve semelhante nos três cenários, destacando a importância de se avaliar não apenas a magnitude da precipitação, mas também sua distribuição temporal na definição das situações críticas de projeto.

De modo geral, os resultados reforçam que eventos de curta duração concentram risco máximo de sobrecarga imediata da drenagem, enquanto chuvas prolongadas, embora apresentem menor intensidade de pico, podem resultar em volumes totais expressivos e em escoamentos persistentes. Esses padrões reiteram a necessidade de considerar múltiplas durações críticas no dimensionamento de sistemas de macrodrenagem e na gestão de riscos de inundações.

A Tabela 5-5 apresenta os resultados das vazões de pico no exutório para cada simulação. Em negrito estão destacadas as maiores vazões de pico para cada TR, que correspondem às vazões das durações críticas.

Tabela 5-5 Vazões de pico (m^3/s) por duração e TR.

Duração da chuva	Vazão de pico para diferentes TR (m^3/s)		
	2 ANOS	10 ANOS	100 ANOS
10 minutos	73,1	76,41	81,66
15 minutos	72,63	76,77	78,44
30 minutos	75,8	83,84	80,78
45 minutos	72,41	75,57	83,13
60 minutos	63,01	72,28	80,13
120 minutos	63,84	62,37	70,61

Fonte: Autoria própria (2025).

De forma geral, observa-se que, embora exista uma tendência de maiores picos em eventos de curta duração, há variações importantes conforme o TR considerado, o que evidencia a necessidade de analisar criticamente a duração crítica em cada cenário.

Para os TRs de 2 e 10 anos, a chuva com duração de 30 minutos apresentou os maiores valores de vazão máxima, alcançando $75,8 \text{ m}^3/\text{s}$ e $83,84 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Esse resultado indica que, nesses cenários de menor severidade, o efeito combinado de intensidade e tempo de precipitação foi mais favorável à concentração do escoamento superficial em 30 minutos, resultando no maior potencial de sobrecarga do sistema de drenagem.

Por outro lado, no TR de 100 anos, a maior vazão de pico ocorreu na duração de 45 minutos, com $83,13 \text{ m}^3/\text{s}$. Esse comportamento evidencia que, em eventos mais extremos, o aumento do volume precipitado ao longo de durações um pouco maiores gera escoamentos acumulados que resultam em picos superiores aos das chuvas muito curtas. Tal diferença reflete a capacidade limitada de infiltração e armazenamento superficial da bacia sob eventos críticos, em que o prolongamento da chuva mantém taxas elevadas de geração de escoamento superficial por tempo suficiente para formar picos expressivos.

É importante destacar que, para o TR de 100 anos, a diferença entre a vazão máxima da chuva de 45 minutos e a de 30 minutos é pequena (cerca de 2,3%), mas suficiente para alterar a definição da duração crítica. Já no TR de 10 anos, a diferença é mais pronunciada, com a duração de 30 minutos superando as demais em quase 8% em relação ao evento de 10 minutos.

Dessa forma, os resultados confirmam que:

- Para TR de 2 e 10 anos, a chuva crítica de 30 minutos fundamenta as simulações dos cenários de enchentes.
- Para TR 100 anos, a duração crítica desloca-se para 45 minutos, demonstrando que a severidade do evento torna relevante a contribuição acumulada de chuvas mais longas.

5.7 Validação do evento observado

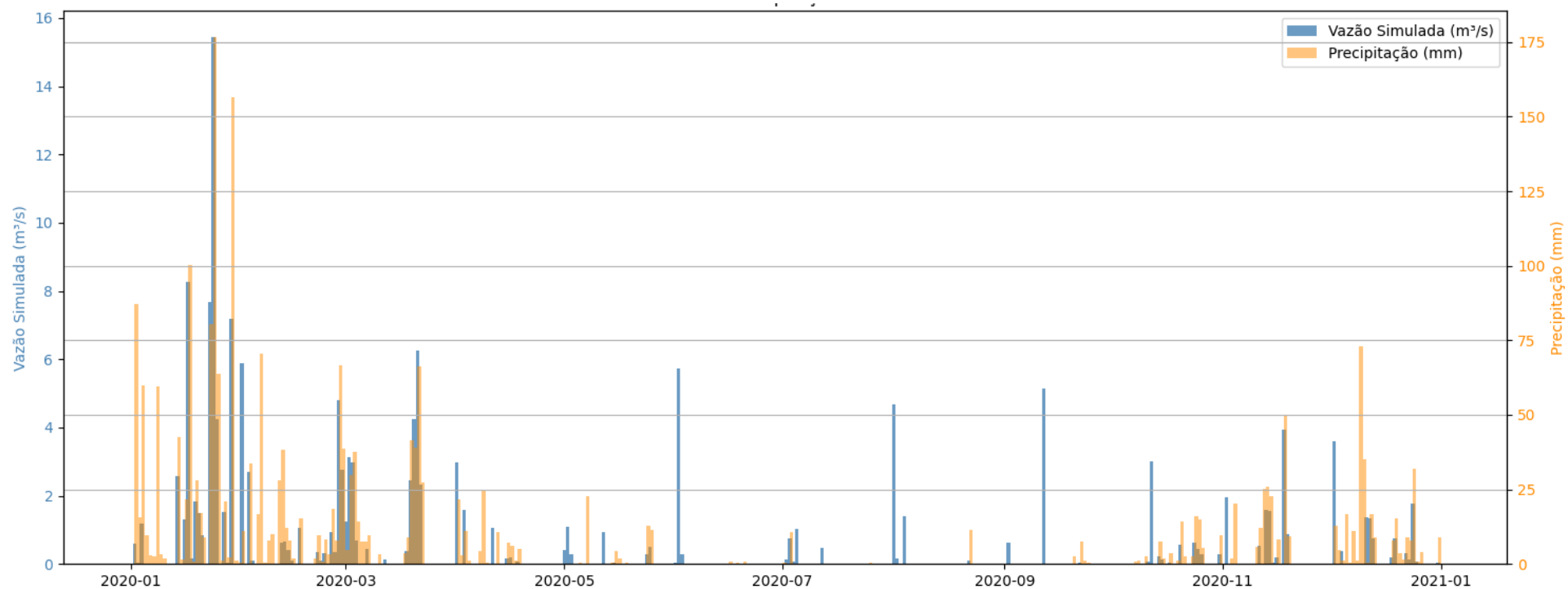
Nesta seção, são apresentados os procedimentos e resultados da etapa de validação do modelo hidrológico implementado no SWMM, com base na simulação de eventos reais registrados nos anos de 2017 e 2020. Foram utilizados dados pluviométricos da estação Cercadinho, do INMET, referentes ao ano de 2020, e dados disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), referentes ao ano de 2017.

A adoção do período de frequência de 30 minutos para a discretização das séries temporais decorreu do fato de esse intervalo ter se mostrado um dos períodos críticos, conforme evidenciado nas análises de chuvas de projeto e na caracterização dos cenários extremos.

Para ambos os anos, será apresentado um conjunto de dois gráficos: um mostrando a série temporal da vazão simulada no exutório da bacia e outro mostrando a vazão acumulada no sistema de drenagem, sempre em associação com a precipitação observada. Ademais, os gráficos incluem a média acumulada diária tanto para a precipitação, expressa em milímetros (mm), quanto para a vazão simulada, apresentada em metros cúbicos por segundo (m^3/s), facilitando a comparação entre a resposta hidrológica do modelo e a variabilidade observada nos dados monitorados.

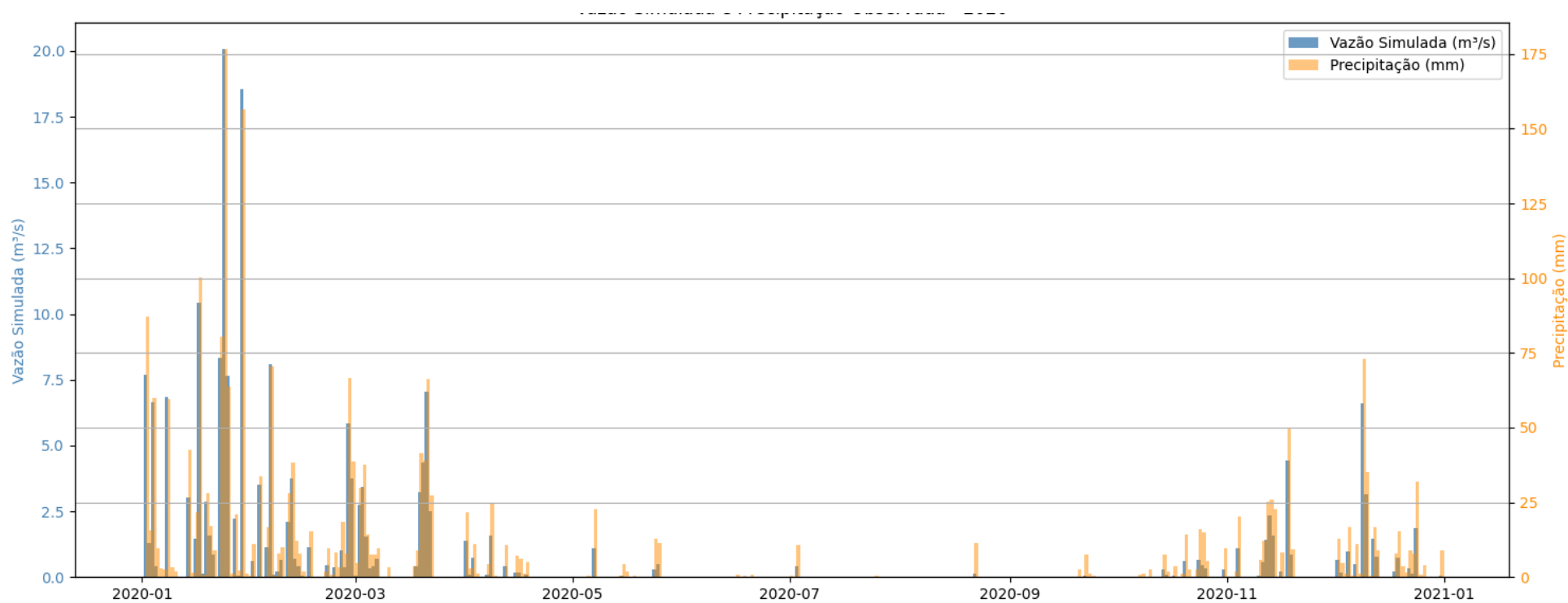
As Figuras Figura 5-9, Figura 5-10, Figura 5-11 e Figura 5-12 apresentam, respectivamente, a comparação entre a vazão simulada pelo modelo SWMM e a precipitação observada ao longo dos anos analisados.

Figura 5-9 - Vazão simulada e precipitação observada em 2020 estação Cercadinho – Exutório.



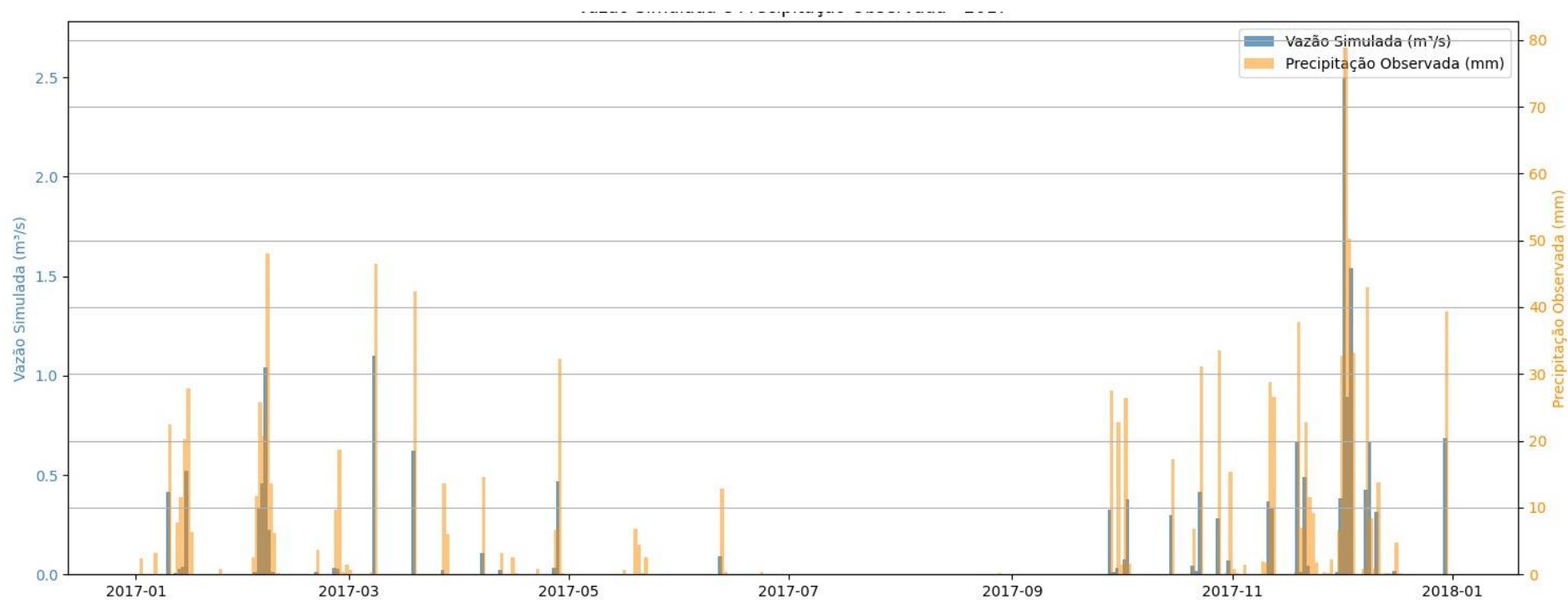
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-10 - Vazão simulada e precipitação observada em 2020 estação Cercadinho – Sistema.



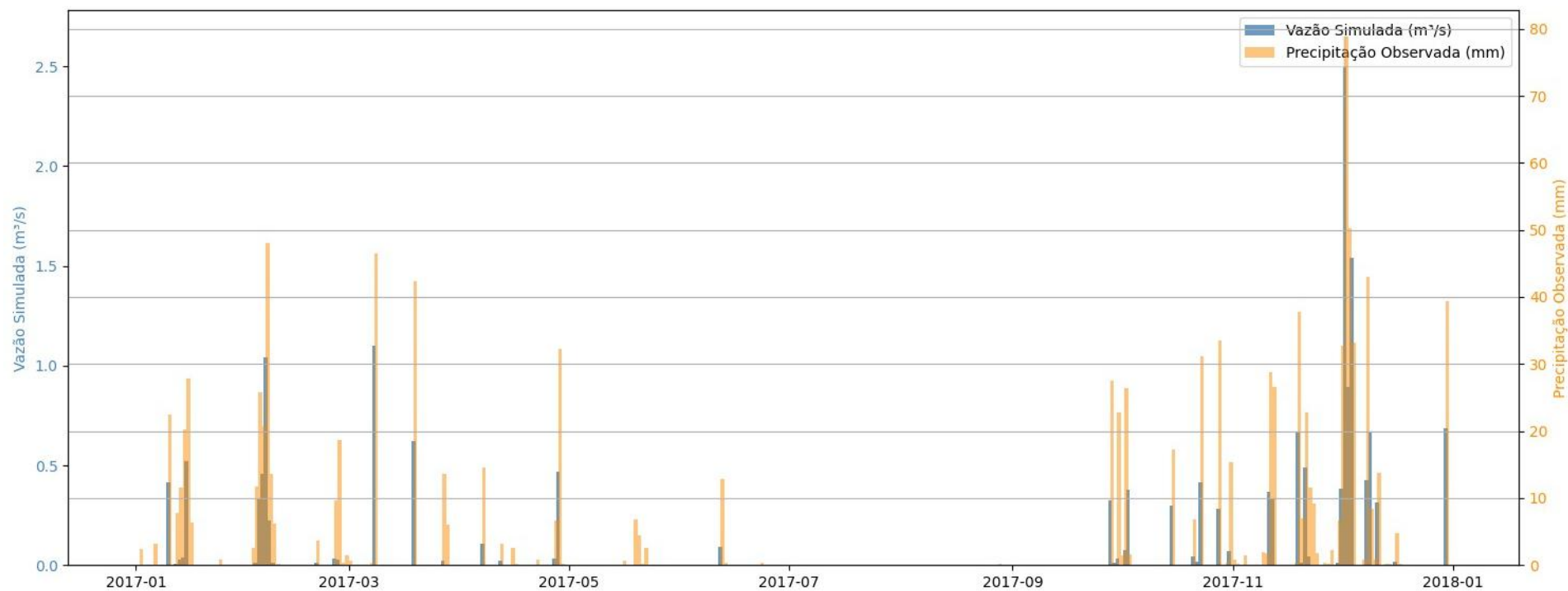
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-11 - Vazão simulada e precipitação observada em 2017 estação 42 PBH – Exutório.



Fonte: Autoria própria (2025).

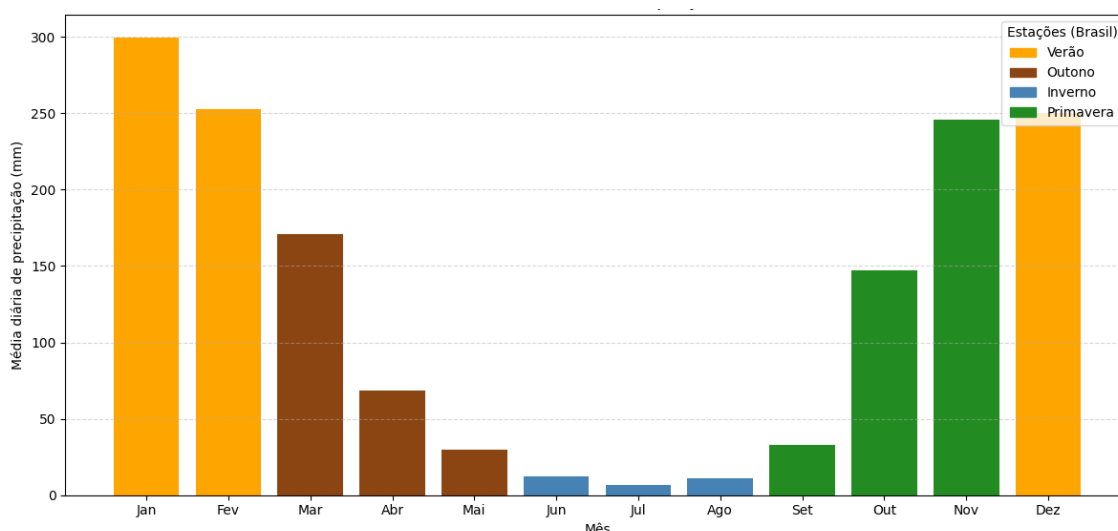
Figura 5-12 - Vazão simulada e precipitação observada em 2017 estação 42 PBH – Sistema.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 5-9 apresenta a comparação entre a vazão simulada no exutório principal da bacia e a precipitação observada ao longo de 2020, considerando a estação Cercadinho do INMET. Nota-se que os maiores picos de vazão simulada se concentram no primeiro trimestre do ano, coincidindo com episódios de precipitação de alta intensidade registrados nos meses de janeiro e fevereiro. Essa distribuição é coerente com o padrão sazonal apresentado no gráfico de média mensal da precipitação, elaborado a partir dos dados do INMET, no qual se evidencia a maior concentração de chuvas no verão.

Figura 5-13 - Média mensal de precipitação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Nesses eventos, a resposta hidrológica mostrou coerência temporal com a ocorrência da chuva, embora, em alguns casos, tenha sido observada uma subestimativa da vazão simulada em relação à intensidade aparente dos eventos pluviométricos. A vazão de recessão das descargas simuladas apresenta declínio rápido após os picos, refletindo o caráter predominantemente urbano da bacia e o tempo de concentração reduzido.

A Figura 5-10 exibe a vazão simulada no sistema interno de drenagem para o mesmo período e estação. Os valores de vazão simulada nesse ponto tendem a ser superiores aos observados no exutório, atingindo picos próximos de 20 m³/s nos episódios de maior intensidade pluviométrica. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito de concentração inicial do escoamento superficial antes da atenuação proporcionada pelo sistema de retenção e armazenamento distribuído na bacia. Ressalta-se que, ao longo do ano hidrológico, o modelo

reproduziu adequadamente a sequência de picos e períodos de estiagem, ainda que se observe alguma discrepância pontual na magnitude dos eventos simulados.

Os dois gráficos referentes ao ano de 2017 (Figura 5-11 e Figura 5-12) foram produzidos com base nos dados pluviométricos disponibilizados pela PBH. Esses dados apresentaram maior incidência de falhas e lacunas, fato que pode ter contribuído para a redução da qualidade do ajuste entre precipitação observada e vazão simulada em alguns períodos. Apesar dessa limitação, observa-se que os picos de vazão simulada acompanham, em termos gerais, a ocorrência dos eventos de maior precipitação, especialmente no final do ano, quando foram registrados os episódios mais expressivos de chuva. Os valores máximos simulados, nesse caso, não ultrapassaram 2,5 m³/s, refletindo tanto a magnitude dos eventos quanto possíveis subestimativas associadas à qualidade dos dados de entrada.

De maneira geral, os quatro gráficos evidenciam que:

- O modelo SWMM apresentou capacidade de reproduzir de forma satisfatória a resposta hidrológica global da bacia frente a precipitações observadas.
- A frequência temporal de 30 minutos adotada mostrou-se adequada para representar os padrões de resposta rápida, particularmente nos eventos mais intensos.
- Os picos de vazão simulados ocorrem com atraso compatível ao tempo de concentração estimado para a bacia.
- A comparação entre o exutório e o sistema interno de drenagem evidencia o papel de atenuação do sistema urbano e a diferença de magnitude entre os pontos de controle.
- A presença de dados pluviométricos com falhas no ano de 2017 limitou parte das análises, reforçando a importância de séries consistentes para calibração e validação de modelos hidrológicos.

5.8 Análise de Tendências nas Séries de Eventos Extremos de Precipitação

Foi realizada a análise de tendências nas séries de eventos extremos de precipitação, com base nos índices climáticos de precipitação definidos pelo *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI). Esses índices encontram-se descritos na Figura

5-14. Para essa etapa, foram organizadas as séries temporais anuais dos índices de precipitação, considerando o ano hidrológico como período de referência para a avaliação das variações e tendências ao longo do tempo.

Figura 5-14 - Índices de Precipitação.

Sigla	Nome do Índice	Definição	Unidade
CDD	Número anual de dias secos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com $P < 1$ mm	dias
CWD	Número anual de dias chuvosos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com $P \geq 1$ mm	dias
SDII	Índice de intensidade diária	Total anual de precipitação em dias chuvosos ($P \geq 1$ mm) dividido pelo número de dias chuvosos ($P \geq 1$ mm) no ano hidrológico	mm/dia
R10	Número anual de dias chuvosos acima de 10 mm	Número de dias no ano com $P \geq 10$ mm	dias
R20	Número anual de dias chuvosos acima de 20 mm	Número de dias no ano com $P \geq 20$ mm	dias
R30	Número anual de dias chuvosos acima de 30 mm	Número de dias no ano com $P \geq 30$ mm	dias
R40	Número anual de dias chuvosos acima de 40 mm	Número de dias no ano com $P \geq 40$ mm, sendo o limiar a ser estabelecido	dias
Rx1day	Precipitação máxima mensal em 1 dia consecutivo	Precipitação máxima mensal de 1 dia chuvoso	mm
Rx5day	Precipitação máxima mensal em 5 dias consecutivos	Precipitação máxima mensal de 5 dias consecutivos chuvosos	mm
R95p	Dias muito chuvosos	Precipitação anual total em que $P >$ percentil 95	mm
R99p	Dias extremamente chuvosos	Precipitação anual total em que $P >$ percentil 99	mm
PrcpTot	Total anual de dias chuvosos	Total anual de chuva em dias chuvosos ($P \geq 1$ mm)	mm

Fonte: Zhang e Yang (2004) apud Nunes (2018).

A Figura 5-15 apresenta as séries temporais dos índices climáticos de precipitação, calculados com base nos dados anuais do período de 2014 a 2024. Os gráficos ilustram tanto a variação interanual de cada índice quanto as tendências lineares estimadas ao longo da série histórica, permitindo identificar padrões de comportamento associados à frequência, intensidade e

ocorrência de eventos extremos de precipitação na área de estudo. Os dados utilizados são referentes à estação meteorológica Cercadinho, pertencente à rede do INMET.

Os resultados indicam uma tendência predominante de aumento tanto da frequência quanto da intensidade das chuvas na área monitorada. O índice CDD apresentou uma tendência crescente significativa, sugerindo que, paralelamente à intensificação dos eventos chuvosos, há também períodos secos prolongados mais recorrentes, evidenciando um padrão de maior variabilidade intra e interanual. O CWD mostrou uma elevação moderada ao longo do período, indicando uma leve ampliação no número máximo de dias chuvosos consecutivos.

O índice SDII apresentou trajetória ascendente consistente, apontando um aumento na intensidade média diária das precipitações, corroborando o comportamento identificado nos demais índices de chuvas intensas. De forma convergente, os índices R10, R20, R30 e R40 também revelaram tendências de crescimento expressivo, demonstrando elevação progressiva do número de dias anuais com chuvas superiores a 10, 20, 30 e 40 mm.

Os índices de precipitação extrema, Rx1day e Rx5day, mostraram aumento relevante nas máximas mensais de precipitação concentrada em 1 e 5 dias consecutivos, com variações interanuais significativas, mas tendência linear positiva ao longo da série.

Os percentis R95p e R99p apresentaram elevação clara, com destaque para o R95p, cuja tendência indica aumento na contribuição dos dias muito chuvosos ao total anual. De maneira consistente, o índice PrcpTot também mostrou incremento ao longo do período analisado, com elevação do total anual de precipitação em dias chuvosos.

De forma geral, as séries temporais apontam para um cenário de intensificação das chuvas extremas, com elevação tanto da frequência de eventos acima dos limiares de intensidade quanto do volume total acumulado, combinada a uma tendência de prolongamento de períodos secos. Este quadro evidencia a necessidade de atenção redobrada ao dimensionamento e à gestão da drenagem urbana e do controle de enchentes, considerando o aumento da variabilidade e severidade dos episódios pluviométricos ao longo dos últimos anos.

Figura 5-15 - Séries temporais dos índices climáticos Estação Cercadinho.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 5-16 apresenta a análise de tendência da estação 83587 no período de 2000 a 2025.

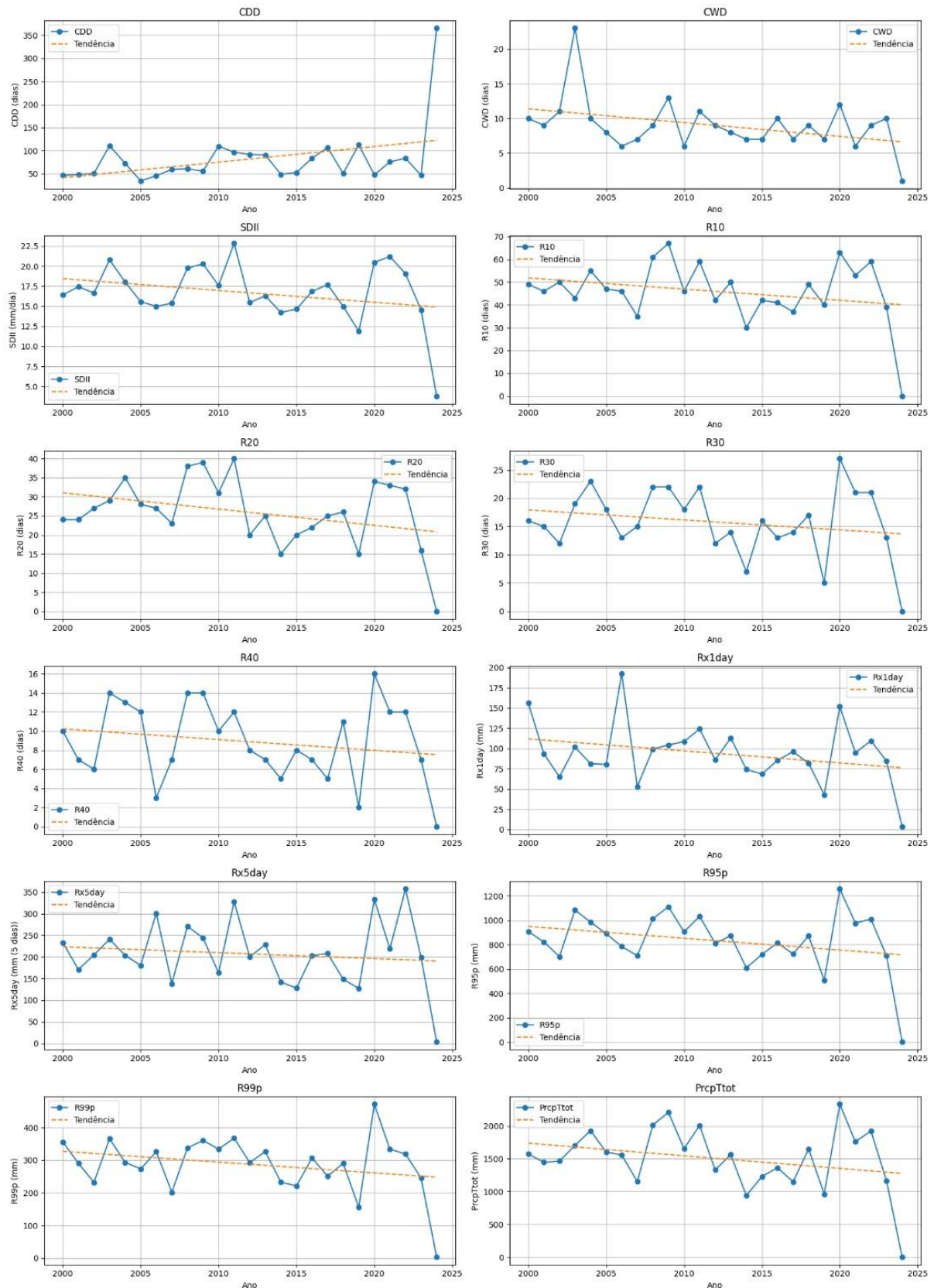
A análise das séries temporais dos índices climáticos de precipitação calculados para a estação meteorológica INMET 83587, no período de 2000 a 2024, evidencia um comportamento predominantemente caracterizado pela redução gradual da frequência e da intensidade de eventos chuvosos mais expressivos. Observa-se que o índice CDD apresentou tendência de crescimento moderado, indicando maior ocorrência de períodos secos prolongados ao longo dos anos, enquanto o CWD manteve relativa estabilidade na duração máxima de sequências chuvosas consecutivas. O índice de intensidade diária (SDII) evidenciou uma tendência levemente decrescente, sugerindo redução progressiva da média de intensidade das chuvas nos dias chuvosos.

Os índices que avaliam a frequência de dias com precipitação acima de 10, 20, 30 e 40 mm (R10, R20, R30 e R40) apontaram declínio consistente, reforçando a diminuição do número de dias com chuvas intensas ao longo da série. De modo semelhante, os índices de precipitação máxima mensal em 1 e 5 dias consecutivos (Rx1day e Rx5day) apresentaram alta variabilidade interanual, porém com tendência de redução, indicando menor concentração de volumes extremos em eventos isolados.

Os percentis de precipitação muito chuvosa (R95p) e extremamente chuvosa (R99p) também evidenciaram tendência negativa, com menor contribuição dos eventos mais extremos ao total anual. Por fim, o índice PrcpTot apresentou declínio discreto ao longo do período, mostrando que os totais anuais de precipitação têm se tornado gradativamente mais baixos. De forma geral, os resultados sugerem que a bacia vem experimentando maior irregularidade na distribuição das chuvas, com redução da ocorrência e da magnitude dos eventos intensos e maior predominância de períodos secos prolongados, evidenciando um cenário de maior variabilidade interanual que pode trazer implicações tanto para o gerenciamento de estiagens quanto para a mitigação de impactos relacionados à drenagem urbana.

Figura 5-16 - Séries temporais dos índices climáticos Estação 83587.

Séries Temporais dos Índices Climáticos



Fonte: Autoria própria (2025).

Apesar das tendências observadas nas séries temporais de precipitação para as duas estações avaliadas (Cercadinho e a estação 83587 do INMET), constata-se que os resultados apresentam padrões parcialmente divergentes em alguns índices. Enquanto os dados da estação Cercadinho indicam tendência generalizada de aumento na frequência e intensidade das chuvas, os registros da estação 83587 evidenciaram reduções sutis ou estabilidade em alguns índices, como R10, R20, R30 e Rx1day, principalmente quando considerada a série histórica mais longa (2000–2024).

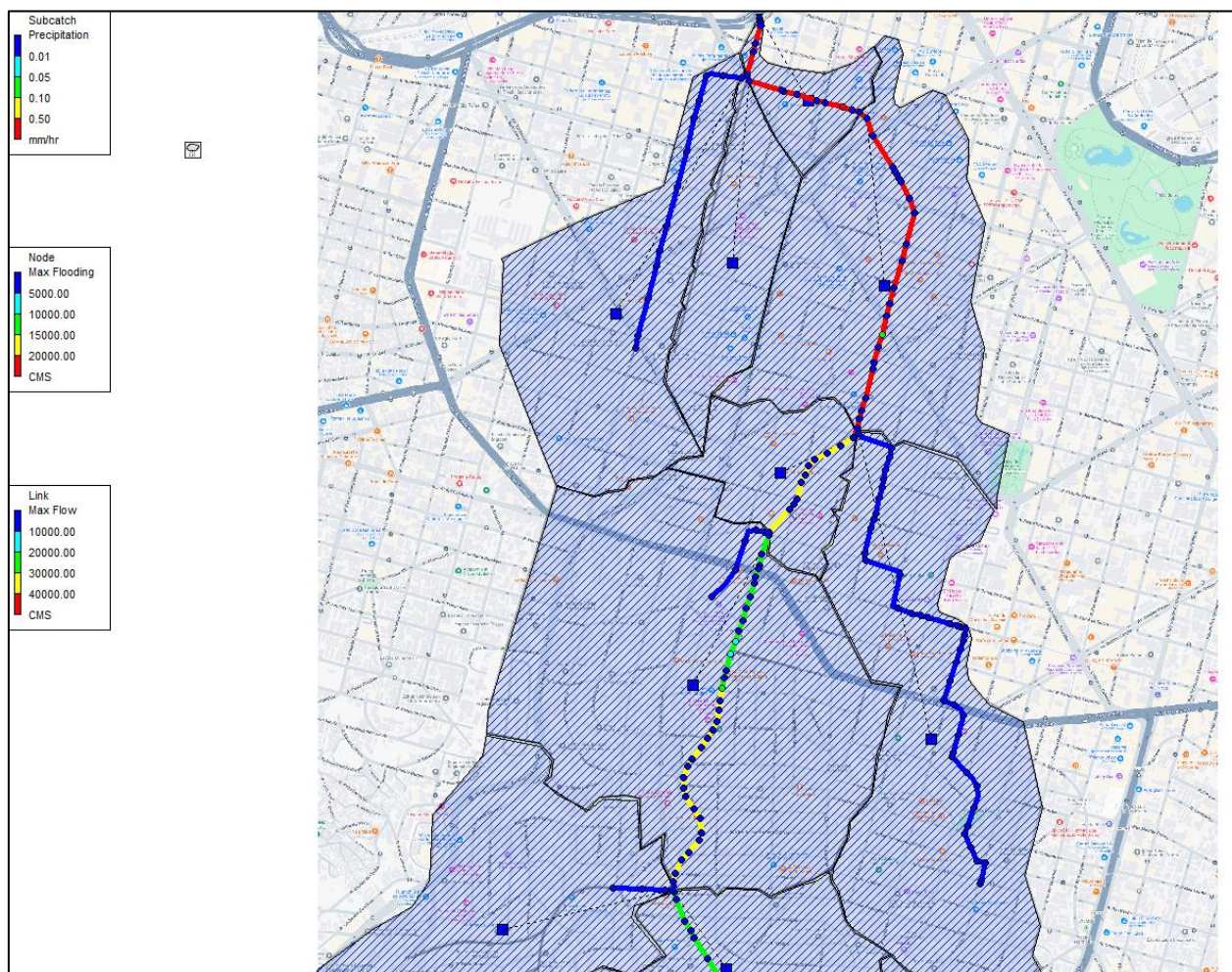
Essa divergência pode ser atribuída a fatores como diferenças na localização geográfica das estações, variações microclimáticas locais e diferença nos períodos de medição. Essa divergência pode ser atribuída a fatores como diferenças na localização geográfica das estações, variações microclimáticas locais e discrepâncias nos períodos de medição. Adicionalmente, a extensão temporal relativamente curta da série histórica (apenas 10 anos) reduz sua robustez estatística, comprometendo a capacidade de identificar tendências significativas e contribuindo para a menor convergência dos resultados.

Diante desses pontos divergentes, ressalta-se que a análise de uma única ou de poucas estações pode não ser suficiente para confirmar, uma tendência consolidada de intensificação ou redução da precipitação extrema na bacia do Córrego Leitão.

5.9 Modelagem hidráulica dos locais de inundação

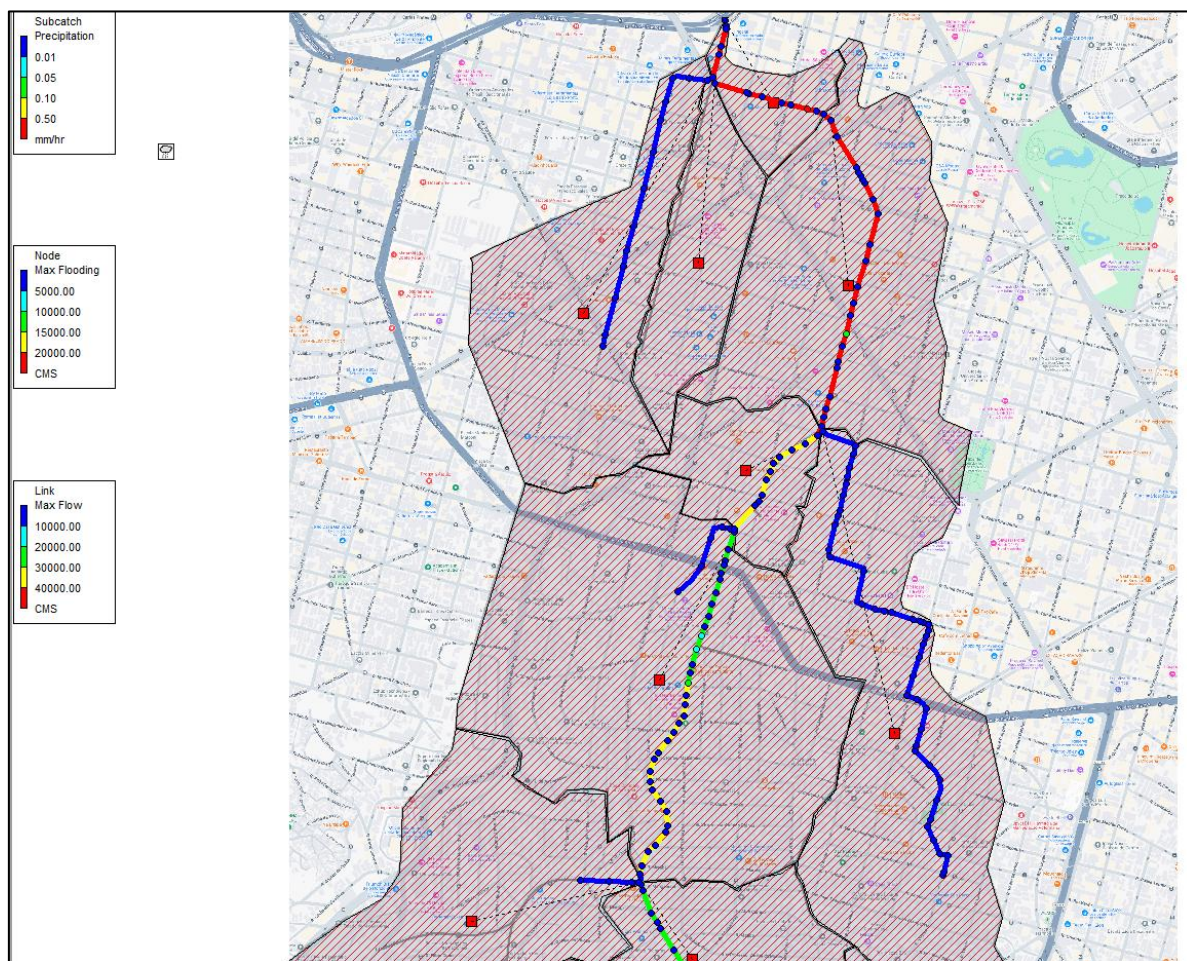
Os resultados da modelagem hidráulica das manchas de inundação obtidas no SWMM, para os dois cenários estudados e precipitações dos anos de 2017 e 2020, são apresentados em mapas nas figuras (Figura 5-17, Figura 5-18, Figura 5-19, Figura 5-20). Esses resultados são analisados e discutidos na seção posterior.

Figura 5-17 - Localização dos pontos críticos 01/12/2017.



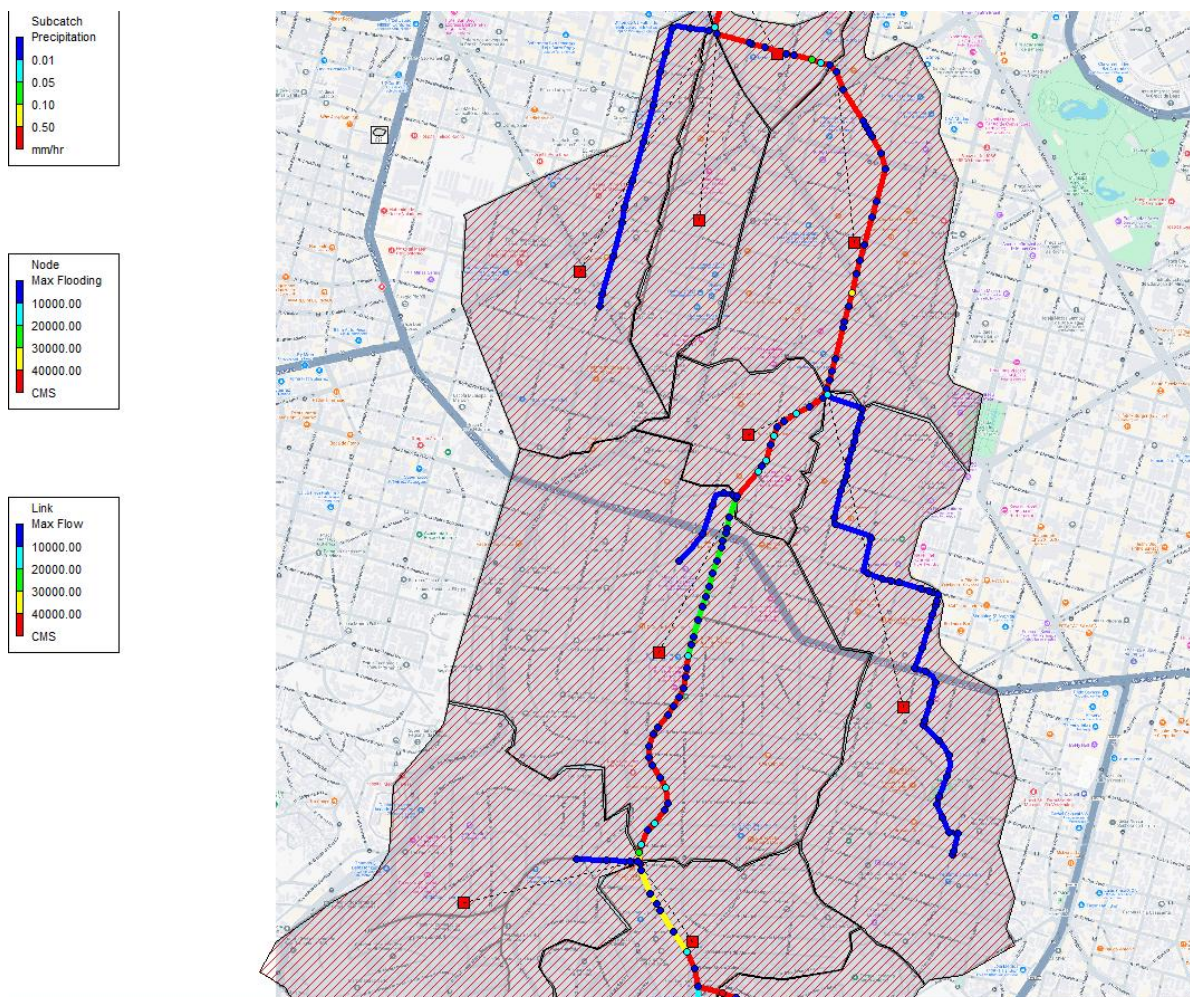
Fonte: Aatoria própria (2025)..

Figura 5-18 - Localização dos pontos críticos 08/12/2017.



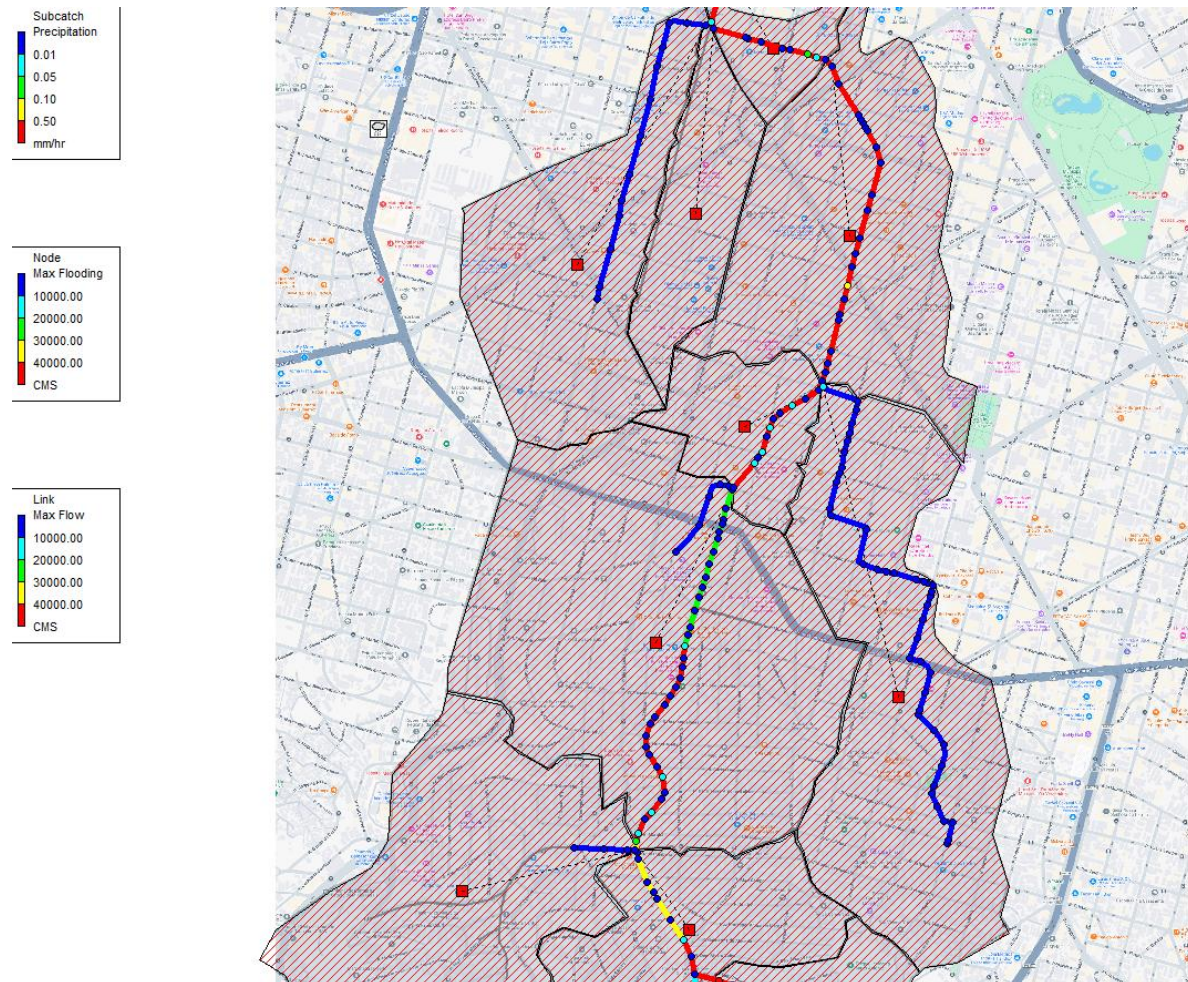
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-19 - Localização dos pontos críticos 04/01/2020.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5-20 - Localização dos pontos críticos 10/10/2020.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para as figuras apresentadas anteriormente, as datas foram escolhidas para representar, simultaneamente, picos de precipitação observada e de vazão simulada.

No módulo de alagamento por nó (tabela *Node Flooding* no Apêndice E) do modelo SWMM, abrangendo os principais pontos da rede de drenagem simulados durante o evento crítico do ano de 2017, no dia 335 do ano hidrológico, por volta das 21:30 horas, concentrou o período de maior severidade dos alagamentos, refletindo o pico de escoamento superficial.

De maneira geral, os resultados evidenciam a alta intensidade do evento modelado, com taxas momentâneas superiores a 20 m³/s em pontos críticos e extravasamentos ocorrendo de forma

simultânea em múltiplos nós, confirmando a vulnerabilidade do sistema de drenagem frente a precipitações extremas.

O segundo cenário são os resultados da simulação de alagamentos por nó no modelo SWMM, evidenciando a severidade dos extravasamentos ao longo do evento crítico de 2020.

Observa-se que alguns nós se destacaram com volumes acumulados de inundação extremamente elevados. O modelo também apresentou pontos que concentram os maiores extravasamentos do sistema, associados também às maiores taxas instantâneas, chegando a 51,5 m³/s e 33,5 m³/s.

O resultado reforça a vulnerabilidade da bacia simulada em 2020, caracterizada por múltiplos pontos críticos com grande capacidade de extravasamento e períodos prolongados de alagamento, compatíveis com eventos de precipitação extrema observados naquele ano.

6 CONCLUSÃO

A avaliação hidrológica indica que a infraestrutura da sub-bacia do córrego Leitão está subdimensionada. As chuvas de projeto com durações críticas de 30 min (TR 2 e 10 anos) e 45 min (TR 100 anos) resultaram em vazões de pico entre 75,8 e 83,84 m³ s⁻¹. Contudo, a vazão estimada para TR 100 anos (80,78 m³ s⁻¹) não superou a obtida para TR 10 anos, evidenciando inconsistências que exigem a recalibração dos parâmetros pluviométricos e de infiltração adotados. Esses valores excedem a capacidade nominal do canal, confirmando a vulnerabilidade hidráulica do sistema em eventos de curta duração.

Quanto ao desempenho do modelo, o SWMM apresentou capacidade de reproduzir de forma satisfatória a resposta hidrológica global da bacia frente a precipitações observadas nos eventos observados de 2017 e 2020. Essa resposta reforça a adequação dos parâmetros de rugosidade, largura característica e percentuais de área impermeável transferidos do estudo de Rosa (2017).

Os resultados hidrológicos refletem pressões antrópicas marcantes: uso residencial domina 42,56 % da área da bacia, enquanto setores não residenciais somam 15,19 %; o processo de verticalização pós 2010 intensificou a densidade construtiva da área.

Em paralelo, os valores de Curve Number (CN) aferidos para 2021 são majoritariamente superiores a 85, indicando baixa infiltração e geração rápida de escoamento superficial.

Do ponto de vista climático, a estação Cercadinho (2014-2024) aponta tendência consistente de aumento na frequência e na intensidade das chuvas extremas, ao passo que a estação INMET 83587 (2000-2024) revela redução gradual desses índices. A divergência reforça a necessidade de ampliar a rede de monitoramento para capturar a variabilidade espacial e temporal das precipitações.

A severidade dos eventos de 2020 foi corroborada pelo módulo Node Flooding, que registrou extravasamentos simultâneos em múltiplos nós, com vazões instantâneas locais de até 51,5 m³ s⁻¹, confirmando a suscetibilidade da bacia a enchentes rápidas.

Em resumo, a bacia do córrego Leitão opera próxima ao seu limite hidráulico e recomenda-se:

- Recalibrar as curvas IDF e parâmetros de infiltração para TR ≥ 100 anos;

- Redimensionar galerias e implantar dispositivos de controle de pico em trechos críticos;
- Incentivar soluções baseadas na natureza para aumentar a infiltração; e
- Expandir o sistema pluviométrico e hidrométrico, fornecendo dados de melhor qualidade que sustentem planejamento urbano e gestão de riscos mais eficazes.

7 REFERÊNCIAS

ABALEN, Isabela. Governo de MG multa PBH em R\$ 68 mil por danos ambientais em rompimento de barragem da lagoa do Nado. **O Tempo**, 26 nov. 2024. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/2024/11/26/governo-de-mg-multa-pbh-em-r--68-mil-por-danos-ambientais-em-rom>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ALMEIDA, Jean Carlos B. **Drenagem urbana**. 1. ed. São Paulo: Contentus, 2020. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 05 dez. 2024.

BARBOSA JÚNIOR, Antenor Rodrigues. **Elementos de hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2022. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/206204>. Acesso em: 03 dez. 2024.

BELO HORIZONTE. **Lei nº 11.181, de 08 de agosto de 2019**. Aprova o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2019.

BORSAGLI, Alessandro. **O Vale do Córrego do Leitão em Belo Horizonte: contribuições da cartografia para a compreensão da sua ocupação**. In: 1.º Simpósio Brasileiro de Cartografia Histórica – Passado presente nos velhos mapas: conhecimento e poder, Paraty, RJ, 10–13 maio 2011. Trabalho apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC-MG, 2011. Disponível em: https://www.ufmg.br/rededemuseus/crch/simposio/BORSAGLI_ALESSANDRO.pdf#:~:text=2%20O%20C%C3%B3rrego%20do%20Mendon%C3%A7a%2C,com%20a%20Rua%20S%C3%A3o%20Paulo. Disponível em: 05 jun. 2025.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei 9.433/97**. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 22 jul. 2025

CÂNDIDO, Edilaine Gomes da Silva. **Modelagem hidrológica e hidráulica da bacia do córrego Ressaca (Belo Horizonte, MG) utilizando o modelo SWMM**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

COSTA, Walter Duarte. **Caracterização das Condições de Uso e Reservação das Águas Subterrâneas do Município de Belo Horizonte - MG**. Tese (Doutorado): Recursos Minerais e Hidrogeologia - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

COSTA, Maria Elisa Leite; TSUJI, Thays Mitsuko; KOIDE, Sérgio. Modelagem hidrológica e hidráulica usando o SWMM-Storm Water Management Model na bacia urbana do Riacho Fundo I-Distrito Federal. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e6010111458-e6010111458, 2021.

COLLODEL, Milena Gardai. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 225 p. Disponível em:

<https://doi.org/10.11606/D.18.2009.tde-14102009-182636> Acesso em: 05 dez. 2024.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1988. 572 p. Disponível em:

https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

DE FARIA, Estephane Cristina et al. Hietogramas obtidos a partir de relações IDF para as mesorregiões sul/sudoeste e Campo das Vertentes, MG. **Sustentare**, v. 2, n. 2, p. 1-15, 2018.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª Ed. – Rio de Janeiro: Interciência. 1998. Disponível em:

https://professor.ufop.br/sites/default/files/roberthfagundes/files/fundamentos_de_limnologia_-_francisco_de_assis_esteves.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 1 mapa. Escala 1:5 000 000.

FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI – FCO. Instrução técnica para elaboração de estudos e projetos de drenagem: **Apêndice 1 – Intensidade, duração e frequência (IDF) para a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni – UFMG, 10 p. 2022.

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99-108, 2006. Disponível em:

<https://biblat.unam.mx/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2006/vol11/no4/10.pdf>>

Acesso em: 24 jul. 2025.

GARCEZ, Lucas Nogueira; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Hidrologia**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Blucher, 1988. Disponível em:

<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/177687/pdf/> Acesso em: 05 dez. 2024.

HUBER, Wayne. C.; DICKINSON, Robert. E. **Storm Water Management Model**, version 4: user's manual. U. S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.

GOMES, Raul Carneiro; BIANCHI, Christina; OLIVEIRA, Vlândia Pinto Vidal de. Análise da multidimensionalidade dos conceitos de bacia hidrográfica. **GEographia, Niterói**, v. 23, n. 51, p. 1-17, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo 2022**:

Panorama – Belo Horizonte. 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>.

Acesso em: 24 jul. 2025.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

JATOBÁ, Sérgio Ulisses Silva. Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social. **Boletim regional, urbano e ambiental**. 2011. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5567/1/BRU_n05_urbanizacao.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (Tradução). **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0**. UFPB: 2012. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf. Acesso em 24 jul. 2025.

LIMA-QUEIROZ, J. C.; BALABRAM, P. R.; BAPTISTA, M. B. **A urbanização e alguns de seus impactos na cidade de Belo Horizonte**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. 2003. p. 7-15. Disponível em em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/154/251.pdf>> Acesso 07 fev 2025.

Manual do Usuário EPA SWMM 5.0. UFPB: 2012. Disponível em: https://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-swmm/manual_swmm.pdf>. Acesso em 23 jan 2025.

MACHADO, Eneas Souza. **Modelo hidrológico determinístico para bacias urbanas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 286p. 1981.

MARINHO FILHO, Gilberto Milhomem; ANDRADE, Rui da Silva; ZUKOWSKI JUNIOR, Joel Carlos; MAGALHÃES FILHO, Luiz Norberto Lacerda. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais, Canoas**. v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **CQU urbano**. 1. ed. São Paulo: Contexto, 2013. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/3442/pdf> . Acesso em: 05 dez. 2024.

MONTE-MOR, Roberto César de Almeida. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro**. 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-92RHDP>. Acesso em: 2 nov. 2024.

MORIASI, Daniel; ARNOLD, Jeff; VAN LIEW, Michael; BINGNER, Ron; HARMEL, R.D.; VEITH, Tamie. (2007). **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. Transactions of the ASABE. 50. 10.13031/2013.23153.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. **A discussion of principles**. J. Hydrol., v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.)

NAGHETTINI, Mauro. C., **Notas de Aula de Engenharia de Recursos Hídricos**, Apostila, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte-MG, 1999. Disponível em: <

https://www.researchgate.net/profile/Mauro-Naghetini/publication/306959729_Engenharia_de_Recursos_Hidricos_ApostilaSebentaDraft/links/57c084b908ae2f5eb3322339/Engenharia-de-Recursos-Hidricos-Apostila-Sebenta-Draft.pdf> 23 jan 2025.

NOGUEIRA, M. M. **Elaboração da curva chave dos córregos Ressaca e Sarandi utilizando métodos computacionais**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>. Acesso em: 2 nov. 2024.

NUNES, Aline de Araújo et al. **Adaptability of the city of Belo Horizonte to changes in rainfall patterns—a case study of the Ressaca Stream Basin**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 28, 2023.

NUNES, Aline de Araújo. **Tendências em eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte: detecção, impactos e adaptabilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-B3VGXU> Acesso em: 05 dez. 2024.

OLIVEIRA, Mychelle Karla Teixeira de; MACEDO, Renata Cristina Borges da Silva; REBOUÇAS, Cristina Karine de Oliveira; SILVA, Kelem Cristiany Nunes. Ação antrópica na erosão de solo em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro .*Holos*, [S. l.], v. 8, n. 39, 2024. DOI: 10.15628/holos.2023.16838. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16838>. Acesso em: 5 dez. 2024.

OLIVEIRA, Diego Barreto de (org.). **Hidrologia**. São Paulo: Pearson, 2016. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/127458/pdf/>. Acesso em: 05 dez. 2024.

ONU. Department of Economic and Social Affairs. **The Sustainable Development Goals Report 2025**. New York: United Nations, 2025. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE – PBH. **Diretoria de Gestão de Águas Urbanas: Programa Drenurbs**. Belo Horizonte: PBH, 2018. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-e-infraestrutura/informacoes/diretoria-de-gestao-de-aguas-urbanas/drenurbs>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. Secretaria Municipal de Políticas Urbanas. **Cartas de Inundações**. 2019. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/index.php/obras-e-infraestrutura/informacoes/diretoria-degestao-de-aguas-urbanas/cartas-de-inundacoes>. Acesso em: 30 mar. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. **Prefeitura de Belo Horizonte mapeia principais pontos de alagamento da cidade**. 2020a. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/prefeitura-de-belo-horizonte-mapeia-principais-pontos-de-alagamento-da-cidade>. Acesso em: 09 mar. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. Secretaria Municipal de Política Urbana. **Ocupação do Solo:** novo Plano Diretor. Belo Horizonte: PBH, 2020b. 128 p. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-degoverno/politica-urbana/2023/versao-completa-atualizada_1.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE – PBH. **Prefeitura de Belo Horizonte conclui obra no Córrego Leitão.** Belo Horizonte: PBH, 2022a. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/prefeitura-de-belo-horizonte-conclui-obra-no-corrego-leitao>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE – PBH. Apêndice 10 – Curve number e coeficiente de escoamento. In: **Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem.** Belo Horizonte: PBH, dez. 2022b. 25 p. Disponível em: [arquivo pessoal]. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE – PBH. **Barragem Santa Lúcia recebe obras de desassoreamento.** Belo Horizonte: PBH, 2023a. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/barragem-santa-lucia-recebe-obras-de-desassoreamento>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE – PBH. **Contrato n.º 2023.0080 – SMOBI: obras e serviços de engenharia.** Belo Horizonte: PBH, 2023b. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/contratos/smobi-obras-e-servicos-de-engenharia-2023-0080>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. **Plano Diretor:** Lei 11.181/19. 2024. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/planejamentourbano/plano-diretor/proposta>. Acesso em: 20 abr. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. Prodabel. **BHMap.** [2025?]. Disponível em: <https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo>. Acesso em: 24 mar. 2025.

PELOGGIA, Alex Ubiratan Goossens. **Delineação e aprofundamento temático da geologia do Tecnógeno do município de São Paulo: as consequências geológicas da ação do homem sobre a natureza e as determinações geológicas da ação humana em suas particularidades referentes ao Tecnógeno.** 1997. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.44.1997.tde-03102014-100328>. Acesso em: 5 dez. 2024.

PINHEIRO, Mariana Rodrigues Carvalhaes; KURY, Karla Aguiar. 1-Conservação ambiental e conceitos básicos de ecologia. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 2, n. 2, p. 15-28, 2008. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/download/2177-4560.20080007/221>. Acesso em: 06 out. 2024

PINHEIRO, Márcia Maria Guimarães; NAGHETTINI, Mauro. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte–RMBH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 73-88, 1998.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro; COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; BUARQUE, Diogo Costa. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888-904, out. 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/230868>. Acesso em: 25 out. 2024.

PERCHÉ, Evandro Alexandre; AMARAL, Luciana Peixoto. Simulação Hidrológica Da Bacia De Detenção Santa Lúcia, Na Cidade De Belo Horizonte. **Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais: Belo Horizonte, Brazil**, 2015.

RAMOS, MHD. **Drenagem urbana: aspectos urbanísticos, legais e metodológicos em Belo Horizonte**. 1998. 103 f. 1998. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) -Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1998.

REIS, Patricia Elizamma. **O escoamento superficial como condicionante de inundação em Belo Horizonte, MG: estudo de caso da sub-bacia córrego do Leitão, bacia do Ribeirão Arrudas**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) –Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-8JAJ8X>. Acesso em: 2 nov. 2024.

REIS, Patrícia Elizamma, et al. O escoamento superficial como condicionante de inundações em Belo Horizonte, MG: Estudo de caso da sub-bacia Córrego do Leitão, bacia do Ribeirão Arrudas. **Geociências**, v. 31, n. 1, p. 31–46, 2012.

RENNÓ, Camilo Dalles; SOARES, João Viane. Capítulo 2 - Conceitos básicos de modelagem hidrológica. In: CAMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira (org.). **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. Belo Horizonte: INPE, 2003.Cap. 2.

RIGHETTO, Antônio Marozzi. **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_4.pdf> Acesso em: 23 jan. 2025.

ROSA, Deyvid Wavel Barreto. **Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: Bacia do Córrego do Leitão, Belo Horizonte, Minas Gerais**. 2017. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AUEEXV>>. Acesso em: 07 fev 2025.

ROSA, Deyvid Wavel Barreto; SILVA, André Felipe Rocha da; CANÇADO, Vanessa Lucena; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. Modelagem hidrológica e hidráulica de inundações para planejamento de emergência e regulação do uso do solo-bacia do ribeirão Arrudas, Belo Horizonte/MG. Encontro nacional de águas urbanas, 15.; **Simpósio de revitalização de rios urbanos**, 5., 2024, Recife. Anais Recife: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2024.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. Stormwater Management Model - Reference Manual. King Drive Cincinnati: **U. S. Environmental Protection Agency**, 2016.

ROSSMAN, Lewis A.; SIMON, Michelle A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. 424 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmmusers-manual-version-5.2.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SANTANA, Derli Prudente. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Embrapa Milho e Sorgo Sete Lagoas, 2003. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/16221/1/Doc_30.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

SANTOS JÚNIOR, Valdevino José dos; SANTOS, Carolina Oliveira. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. **Estação Científica (Unifap)**, Macapá, v. 3, n. 1, p. 19-30, jun. 2013 Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/233924220>. Acesso em: 05 nov. 2024

SANTOS, Laércio Leal dos. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 01-19, set. 2009.

SHINMA, Taís Arrieiro. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2011. 136 p.

SILVA, Talita.; VIÇON-LEITE, Brigitte; PETRUCCI, Guido; NASCIMENTO, Nilo **Monitoramento e modelagem da qualidade da água do escoamento superficial urbano nas bacias dos córregos Ressaca e Sarandi (Minas Gerais, Brasil)**. Águas Urbanas: volume 1. Porto Alegre: ABRH, 2015. 142 p.

SILVEIRA, Marina Pinto Lazarrini; SANTOS, Raylene Raíssa Frade dos; ARAÚJO, Livia Pereira; BRIANEZI, Daniel. Valoração econômica ambiental de desastres naturais ocorridos na regional oeste de Belo Horizonte, MG. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, 2020. DOI: 10.59824/rmrh.v1i1.194. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/NM/article/view/194>. Acesso em: 6 dez. 2024.

SOUSA, Hélio Antônio de. **Estudo da contaminação ambiental da área do Aterro Sanitário da BR-040, da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte – MG**. 1998. 167 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

TEODORO, Valter Luiz Iost et al. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236. Disponível em: <https://revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/236>. Acesso em: 5 dez. 2024.

TUCCI, Carlos. E. M. Modelos Hidrológicos; **colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH**. – 2 ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 112, 2008.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/SfqYWrhrtvkxybFsjYQtx7v/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 5 dez. 2024.

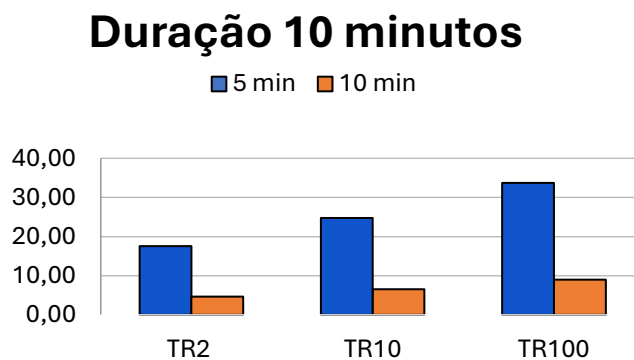
VIESSMAN, Warren.; LEWIS, Gary. L. *Introduction to Hydrology*. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2002. 624 p. ISBN-13 978-0673993373.

WERNICK, Eberhard; Faustino Penalva. "Migmatização e feldspatização de charnockitos e granulitos no leste paulista e sul de Minas Gerais." **Anais 5** (1974): 155-160. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/bitstreams/ced27364-1494-4b03-85c6-664115efba42> Acesso em: 11 jul. 2025.

APÊNDICE A

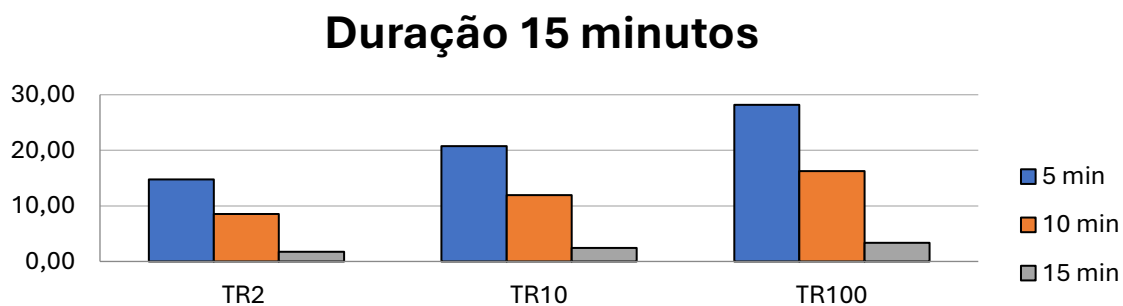
Chuva de projeto

Figura 01 - Hietrogramas duração 10 min



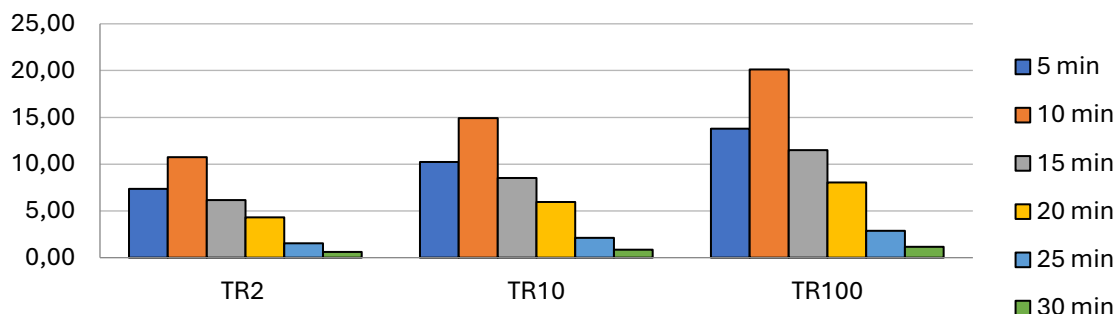
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 02 - Hietrogramas duração 15 min



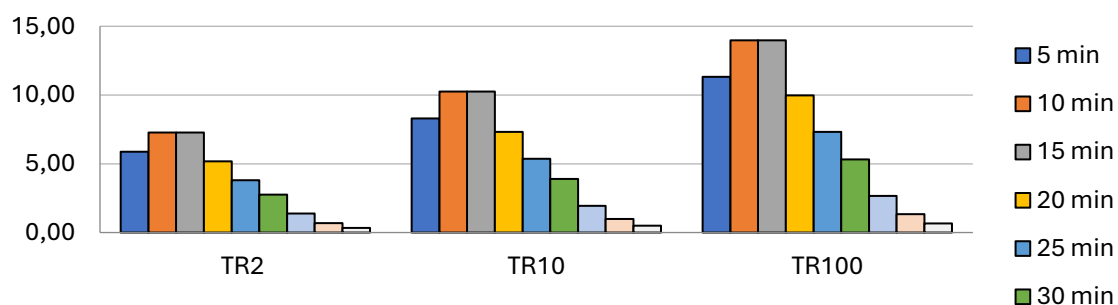
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 03 - Hietrogramas duração 30 min

Duração de 30 minutos

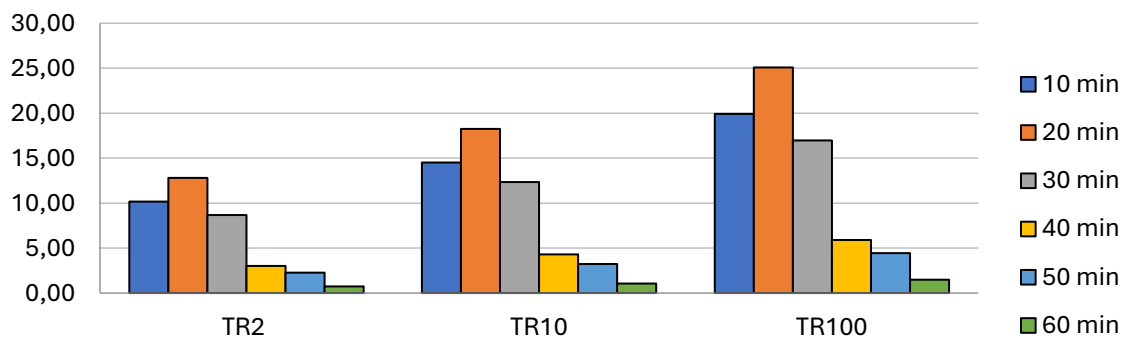
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 04 - Hietrogramas duração 45 min

Duração de 45 minutos

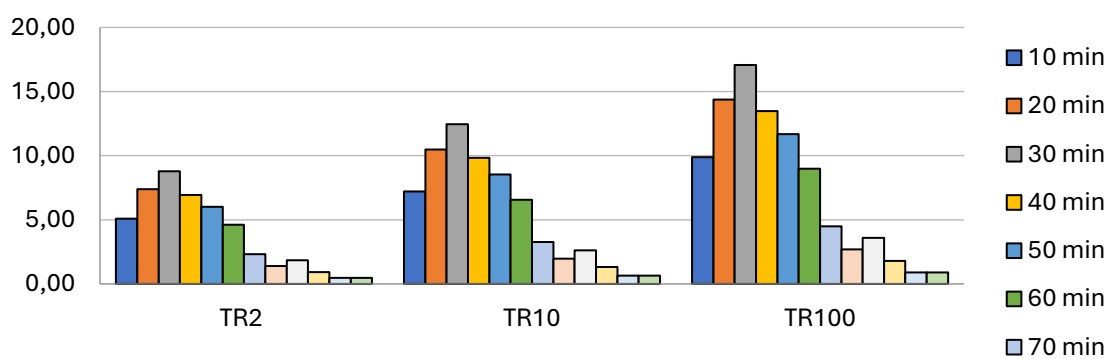
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 05 - Hietrogramas duração 60 min

Duração 60 minutos

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 06 - Hietrogramas duração 120 min

Duração de 120 minutos

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE B

Tabela 01 - Vazão simulada do exutório TR 2 anos

Table - Node 4050							
Elapsed	Elapsed	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow
Days	Hours	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0	00:05:00	0	0	0	0	0	0
0	00:10:00	73,1	63,44	27,09	19,05	0	0
0	00:15:00	64,11	72,63	75,8	45,63	15,07	5,39
0	00:20:00	49,08	52,12	64,83	72,41	30,02	11,58
0	00:25:00	32,26	43,64	56,62	59,92	59,11	19,55
0	00:30:00	24,26	29,01	53,67	54,59	63,01	37,33
0	00:35:00	13,56	19,79	44,43	58	56,88	54,12
0	00:40:00	8,77	11,68	33,67	50,38	55,61	63,84
0	00:45:00	6,24	7,85	23,66	44,98	52,71	63,23
0	00:50:00	4,68	5,69	15,44	34,73	47,7	59,81
0	00:55:00	3,65	4,35	10,43	25,62	43,75	58,39
0	01:00:00	2,93	3,43	7,56	17,74	40,55	57,71
0	01:05:00	2,43	2,78	5,7	12,58	34,3	54,88
0	01:10:00	2,03	2,31	4,44	9	27,37	52,99
0	01:15:00	1,75	1,95	3,53	6,77	20,75	48,01
0	01:20:00	1,5	1,69	2,86	5,27	15,07	42,82
0	01:25:00	1,3	1,45	2,37	4,22	11,3	38,69
0	01:30:00	1,14	1,26	1,98	3,44	8,23	33,8
0	01:35:00	1,01	1,11	1,69	2,86	6,26	30,07
0	01:40:00	0,89	0,98	1,44	2,42	4,9	28,39
0	01:45:00	0,79	0,87	1,24	2,06	3,94	26,17

0	01:50:00	0,71	0,78	1,09	1,79	3,23	23,47
0	01:55:00	0,64	0,69	0,97	1,55	2,69	19,94
0	02:00:00	0,58	0,62	0,86	1,35	2,28	16,43
0	02:05:00	0,52	0,57	0,78	1,19	1,95	14,03
0	02:10:00	0,48	0,51	0,7	1,05	1,7	12,06
0	02:15:00	0,44	0,47	0,63	0,93	1,49	10,15
0	02:20:00	0,4	0,43	0,58	0,83	1,3	8,37
0	02:25:00	0,37	0,39	0,53	0,75	1,15	6,99
0	02:30:00	0,34	0,36	0,48	0,67	1,03	5,59
0	02:35:00	0,31	0,33	0,44	0,61	0,91	4,49
0	02:40:00	0,29	0,31	0,41	0,57	0,82	3,68
0	02:45:00	0,27	0,29	0,38	0,53	0,74	3,08
0	02:50:00	0,25	0,27	0,35	0,49	0,68	2,63
0	02:55:00	0,23	0,25	0,32	0,45	0,62	2,27
0	03:00:00	0,22	0,23	0,3	0,42	0,58	1,98
0	03:05:00	0,2	0,21	0,28	0,39	0,54	1,76
0	03:10:00	0,19	0,2	0,26	0,37	0,5	1,56
0	03:15:00	0,18	0,19	0,24	0,34	0,47	1,39
0	03:20:00	0,17	0,18	0,22	0,32	0,44	1,25
0	03:25:00	0,16	0,17	0,21	0,3	0,41	1,13
0	03:30:00	0,15	0,16	0,2	0,29	0,39	1,03
0	03:35:00	0,14	0,15	0,18	0,27	0,36	0,94
0	03:40:00	0,13	0,14	0,17	0,25	0,34	0,87
0	03:45:00	0,12	0,13	0,16	0,24	0,32	0,8
0	03:50:00	0,12	0,12	0,15	0,23	0,3	0,74
0	03:55:00	0,11	0,12	0,14	0,21	0,29	0,69
0	04:00:00	0,11	0,11	0,13	0,2	0,27	0,64
0	04:05:00	0,1	0,1	0,12	0,19	0,26	0,6
0	04:10:00	0,09	0,1	0,12	0,18	0,24	0,56
0	04:15:00	0,09	0,09	0,11	0,17	0,23	0,53
0	04:20:00	0,09	0,09	0,1	0,16	0,22	0,5
0	04:25:00	0,08	0,09	0,1	0,15	0,2	0,48
0	04:30:00	0,08	0,08	0,09	0,14	0,19	0,46

0	04:35:00	0,07	0,08	0,09	0,14	0,18	0,44
0	04:40:00	0,07	0,07	0,08	0,13	0,17	0,42
0	04:45:00	0,07	0,07	0,08	0,12	0,16	0,4
0	04:50:00	0,07	0,07	0,07	0,12	0,16	0,38
0	04:55:00	0,06	0,06	0,07	0,11	0,15	0,37
0	05:00:00	0,06	0,06	0,07	0,1	0,14	0,35
0	05:05:00	0,06	0,06	0,07	0,1	0,13	0,34
0	05:10:00	0,05	0,06	0,06	0,09	0,13	0,32
0	05:15:00	0,05	0,05	0,06	0,09	0,12	0,31
0	05:20:00	0,05	0,05	0,06	0,09	0,11	0,3
0	05:25:00	0,05	0,05	0,05	0,08	0,11	0,29
0	05:30:00	0,05	0,05	0,05	0,08	0,1	0,28
0	05:35:00	0,05	0,05	0,05	0,07	0,1	0,27
0	05:40:00	0,04	0,04	0,05	0,07	0,09	0,26
0	05:45:00	0,04	0,04	0,05	0,07	0,09	0,25
0	05:50:00	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,24
0	05:55:00	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08	0,23
0	06:00:00	0,04	0,04	0,04	0,06	0,08	0,22
0	06:05:00	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,21
0	06:10:00	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,2
0	06:15:00	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,2
0	06:20:00	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,19
0	06:25:00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	0,18
0	06:30:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,18
0	06:35:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,17
0	06:40:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,16
0	06:45:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,16
0	06:50:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,15
0	06:55:00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,15
0	07:00:00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,14
0	07:05:00	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,14
0	07:10:00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,13
0	07:15:00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,13

0	07:20:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,12
0	07:25:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,12
0	07:30:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,12
0	07:35:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,11
0	07:40:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,11
0	07:45:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,1
0	07:50:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,1
0	07:55:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,1
0	08:00:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,09
0	08:05:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09
0	08:10:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09
0	08:15:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08
0	08:20:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08
0	08:25:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08
0	08:30:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08
0	08:35:00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07
0	08:40:00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,07
0	08:45:00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,07
0	08:50:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07
0	08:55:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06
0	09:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06
0	09:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06
0	09:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06
0	09:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	09:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	09:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	09:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	09:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	09:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	09:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	09:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	09:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	10:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04

0	10:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	10:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	10:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	10:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	11:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	11:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

0	12:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	12:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:10:00	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:15:00	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:20:00	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01
0	13:25:00	0	0	0	0,01	0,01	0,01
0	13:30:00	0	0	0	0,01	0,01	0,01
0	13:35:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:40:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:45:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:50:00	0	0	0	0	0	0,01
0	13:55:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:00:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:05:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:10:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:15:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:20:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:25:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:30:00	0	0	0	0	0	0,01

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE C

Tabela 02 - Vazão simulada do exutório TR 10 anos

Table - Node 4050							
Elapsed	Elapsed	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow
Days	Hours	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0	00:05:00	0	0	0	0	0	0
0	00:10:00	76,41	76,77	41,97	32,12	0	0
0	00:15:00	73,75	72,96	83,84	75,57	26,44	9
0	00:20:00	48,85	54,85	72,42	74,89	61,88	20,11
0	00:25:00	36,99	46,4	62,99	67,97	71,72	36,17
0	00:30:00	26,39	33,3	55,54	60,5	72,28	57,98
0	00:35:00	16,69	26,53	48,2	55	63,95	61,78
0	00:40:00	10,44	16,86	38,1	52,63	62,19	62,37
0	00:45:00	7,32	10,98	29,39	47,48	55,87	58,49
0	00:50:00	5,46	7,64	22,76	39,97	54,07	57,7
0	00:55:00	4,23	5,55	15,01	31,96	50,08	55,76
0	01:00:00	3,38	4,19	10,63	26,28	47,71	55,36
0	01:05:00	2,77	3,31	7,87	18,05	44,71	58,35
0	01:10:00	2,32	2,72	6,04	12,68	34,77	57,25
0	01:15:00	1,96	2,29	4,74	9,42	29,8	54,19
0	01:20:00	1,7	1,95	3,81	7,28	21,55	49,18
0	01:25:00	1,47	1,7	3,13	5,79	15,55	44,79
0	01:30:00	1,28	1,47	2,62	4,7	11,17	40,29
0	01:35:00	1,13	1,28	2,22	3,9	8,42	40,2
0	01:40:00	1	1,13	1,9	3,27	6,6	40,99
0	01:45:00	0,88	0,99	1,66	2,78	5,31	37,96

0	01:50:00	0,79	0,88	1,45	2,41	4,38	33,75
0	01:55:00	0,71	0,78	1,28	2,1	3,66	28,34
0	02:00:00	0,64	0,7	1,15	1,86	3,1	23,28
0	02:05:00	0,58	0,63	1,04	1,66	2,68	19,66
0	02:10:00	0,52	0,57	0,95	1,49	2,33	16,98
0	02:15:00	0,48	0,51	0,86	1,34	2,05	14,29
0	02:20:00	0,44	0,47	0,79	1,21	1,84	11,67
0	02:25:00	0,4	0,43	0,73	1,1	1,66	9,6
0	02:30:00	0,37	0,39	0,67	1,01	1,49	7,47
0	02:35:00	0,34	0,36	0,62	0,93	1,35	5,98
0	02:40:00	0,31	0,33	0,57	0,86	1,23	4,93
0	02:45:00	0,29	0,31	0,53	0,81	1,13	4,16
0	02:50:00	0,27	0,29	0,49	0,76	1,05	3,56
0	02:55:00	0,25	0,27	0,45	0,71	0,97	3,09
0	03:00:00	0,23	0,25	0,42	0,67	0,91	2,72
0	03:05:00	0,22	0,23	0,39	0,63	0,85	2,42
0	03:10:00	0,2	0,21	0,36	0,59	0,8	2,17
0	03:15:00	0,19	0,2	0,34	0,56	0,76	1,96
0	03:20:00	0,18	0,19	0,32	0,53	0,71	1,79
0	03:25:00	0,17	0,18	0,3	0,5	0,67	1,64
0	03:30:00	0,16	0,16	0,28	0,47	0,64	1,51
0	03:35:00	0,15	0,16	0,26	0,45	0,6	1,4
0	03:40:00	0,14	0,15	0,24	0,43	0,57	1,3
0	03:45:00	0,13	0,14	0,22	0,4	0,54	1,21
0	03:50:00	0,12	0,13	0,21	0,38	0,52	1,14
0	03:55:00	0,12	0,12	0,2	0,37	0,49	1,07
0	04:00:00	0,11	0,12	0,18	0,35	0,47	1,01
0	04:05:00	0,11	0,11	0,17	0,33	0,44	0,95
0	04:10:00	0,1	0,1	0,16	0,31	0,42	0,89
0	04:15:00	0,1	0,1	0,15	0,3	0,4	0,85
0	04:20:00	0,09	0,09	0,14	0,29	0,38	0,81
0	04:25:00	0,09	0,09	0,13	0,27	0,37	0,77
0	04:30:00	0,08	0,09	0,13	0,26	0,35	0,74

0	04:35:00	0,08	0,08	0,12	0,25	0,33	0,7
0	04:40:00	0,07	0,08	0,11	0,24	0,32	0,68
0	04:45:00	0,07	0,07	0,11	0,22	0,3	0,65
0	04:50:00	0,07	0,07	0,1	0,21	0,29	0,62
0	04:55:00	0,07	0,07	0,09	0,2	0,28	0,6
0	05:00:00	0,06	0,06	0,09	0,19	0,26	0,57
0	05:05:00	0,06	0,06	0,08	0,18	0,25	0,55
0	05:10:00	0,06	0,06	0,08	0,18	0,24	0,53
0	05:15:00	0,06	0,06	0,07	0,17	0,23	0,51
0	05:20:00	0,05	0,05	0,07	0,16	0,22	0,49
0	05:25:00	0,05	0,05	0,07	0,15	0,21	0,48
0	05:30:00	0,05	0,05	0,06	0,14	0,2	0,46
0	05:35:00	0,05	0,05	0,06	0,14	0,19	0,44
0	05:40:00	0,05	0,05	0,06	0,13	0,18	0,43
0	05:45:00	0,04	0,04	0,05	0,12	0,17	0,41
0	05:50:00	0,04	0,04	0,05	0,12	0,17	0,4
0	05:55:00	0,04	0,04	0,05	0,11	0,16	0,39
0	06:00:00	0,04	0,04	0,05	0,11	0,15	0,37
0	06:05:00	0,04	0,04	0,04	0,1	0,14	0,36
0	06:10:00	0,04	0,04	0,04	0,1	0,14	0,35
0	06:15:00	0,04	0,04	0,04	0,09	0,13	0,34
0	06:20:00	0,03	0,03	0,04	0,09	0,12	0,33
0	06:25:00	0,03	0,03	0,04	0,08	0,12	0,32
0	06:30:00	0,03	0,03	0,03	0,08	0,11	0,3
0	06:35:00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,11	0,3
0	06:40:00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,1	0,29
0	06:45:00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,1	0,28
0	06:50:00	0,03	0,03	0,03	0,06	0,09	0,27
0	06:55:00	0,03	0,03	0,03	0,06	0,09	0,26
0	07:00:00	0,03	0,03	0,03	0,06	0,08	0,25
0	07:05:00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,08	0,24
0	07:10:00	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07	0,24
0	07:15:00	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,23

0	07:20:00	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,22
0	07:25:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,22
0	07:30:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,21
0	07:35:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,2
0	07:40:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,2
0	07:45:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,19
0	07:50:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,18
0	07:55:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,18
0	08:00:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,17
0	08:05:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,17
0	08:10:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,16
0	08:15:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,16
0	08:20:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,15
0	08:25:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,15
0	08:30:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,14
0	08:35:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,14
0	08:40:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,13
0	08:45:00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,13
0	08:50:00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,13
0	08:55:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12
0	09:00:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12
0	09:05:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11
0	09:10:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11
0	09:15:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,11
0	09:20:00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
0	09:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,1
0	09:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,1
0	09:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,09
0	09:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,09
0	09:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,09
0	09:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	09:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	10:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08

0	10:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	10:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	10:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	10:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	10:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	10:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	10:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	10:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	10:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	10:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	10:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	11:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	11:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	11:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	11:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	11:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	11:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	12:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	12:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	12:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

0	12:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	12:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:15:00	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:20:00	0	0	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:25:00	0	0	0,01	0,01	0,01	0,02
0	13:30:00	0	0	0	0,01	0,01	0,01
0	13:35:00	0	0	0	0,01	0,01	0,01
0	13:40:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:45:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:50:00	0	0	0	0	0,01	0,01
0	13:55:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:00:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:05:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:10:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:15:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:20:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:25:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:30:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:35:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:40:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:45:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:50:00	0	0	0	0	0	0,01
0	14:55:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:00:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:05:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:10:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:15:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:20:00	0	0	0	0	0	0,01
0	15:25:00	0	0	0	0	0	0,01

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE D

Tabela 03 - Vazão simulada do exutório TR 100 anos

Elapsed	Elapsed	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow	Total Inflow
Days	Horas	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
0	00:05:00	0	0	0	0	0	0
0	00:10:00	81,07	78,44	58,91	47,26	0	0
0	00:15:00	81,66	74,8	80,78	82,24	40,59	14,37
0	00:20:00	51,28	59,97	79,76	83,13	74,27	28,95
0	00:25:00	41,52	47,09	74,82	75,21	77,92	61,46
0	00:30:00	28,65	37,08	53,68	67,85	80,13	65,82
0	00:35:00	21,91	28,63	49,68	60,37	73,28	69,81
0	00:40:00	12,91	23,01	43,33	56,94	70,42	70,61
0	00:45:00	8,62	14,59	31,1	51,9	54,14	65,26
0	00:50:00	6,34	9,94	26,75	45,22	55,51	64,2
0	00:55:00	4,88	7,18	19,22	35,03	56	61,52
0	01:00:00	3,86	5,36	13,52	27,91	53,24	60,98
0	01:05:00	3,13	4,14	10	22,88	46,67	56,99
0	01:10:00	2,59	3,33	7,69	15,96	39,17	56,17
0	01:15:00	2,18	2,78	6,07	11,85	32,87	54,47
0	01:20:00	1,87	2,38	4,9	9,18	27,24	54,37
0	01:25:00	1,62	2,04	4,05	7,35	19,85	49,27
0	01:30:00	1,42	1,79	3,41	6,03	14,17	45,7
0	01:35:00	1,24	1,56	2,92	5,04	10,73	46,48
0	01:40:00	1,1	1,37	2,53	4,29	8,45	47,9
0	01:45:00	0,97	1,21	2,21	3,69	6,86	45,05
0	01:50:00	0,87	1,08	1,96	3,22	5,71	39,08

0	01:55:00	0,78	0,96	1,76	2,84	4,83	35,47
0	02:00:00	0,7	0,85	1,59	2,54	4,16	31,3
0	02:05:00	0,63	0,77	1,46	2,29	3,62	26,41
0	02:10:00	0,57	0,69	1,34	2,07	3,19	22,94
0	02:15:00	0,52	0,62	1,23	1,9	2,84	19,3
0	02:20:00	0,48	0,56	1,14	1,74	2,56	15,65
0	02:25:00	0,44	0,5	1,06	1,6	2,33	12,56
0	02:30:00	0,4	0,46	0,98	1,49	2,12	9,64
0	02:35:00	0,37	0,42	0,91	1,38	1,95	7,74
0	02:40:00	0,34	0,38	0,85	1,29	1,8	6,42
0	02:45:00	0,32	0,34	0,79	1,21	1,67	5,44
0	02:50:00	0,3	0,32	0,74	1,14	1,55	4,7
0	02:55:00	0,28	0,29	0,69	1,08	1,45	4,12
0	03:00:00	0,26	0,27	0,65	1,02	1,36	3,65
0	03:05:00	0,24	0,25	0,6	0,97	1,29	3,27
0	03:10:00	0,23	0,24	0,57	0,92	1,21	2,95
0	03:15:00	0,21	0,22	0,53	0,87	1,15	2,69
0	03:20:00	0,2	0,21	0,5	0,82	1,09	2,46
0	03:25:00	0,19	0,2	0,47	0,79	1,04	2,27
0	03:30:00	0,18	0,18	0,44	0,75	0,99	2,1
0	03:35:00	0,17	0,17	0,41	0,71	0,94	1,96
0	03:40:00	0,16	0,16	0,39	0,68	0,89	1,84
0	03:45:00	0,15	0,15	0,36	0,65	0,85	1,73
0	03:50:00	0,14	0,15	0,34	0,62	0,81	1,62
0	03:55:00	0,13	0,14	0,32	0,59	0,77	1,53
0	04:00:00	0,13	0,13	0,3	0,56	0,74	1,45
0	04:05:00	0,12	0,13	0,28	0,54	0,7	1,37
0	04:10:00	0,12	0,12	0,27	0,51	0,67	1,3
0	04:15:00	0,11	0,11	0,25	0,49	0,64	1,23
0	04:20:00	0,11	0,11	0,23	0,47	0,61	1,17
0	04:25:00	0,1	0,1	0,22	0,45	0,59	1,12
0	04:30:00	0,1	0,1	0,2	0,43	0,56	1,07
0	04:35:00	0,09	0,09	0,19	0,41	0,54	1,02

0	04:40:00	0,09	0,09	0,18	0,39	0,52	0,98
0	04:45:00	0,08	0,09	0,17	0,38	0,49	0,94
0	04:50:00	0,08	0,08	0,16	0,36	0,47	0,9
0	04:55:00	0,08	0,08	0,15	0,35	0,45	0,87
0	05:00:00	0,07	0,08	0,14	0,33	0,44	0,84
0	05:05:00	0,07	0,07	0,13	0,32	0,42	0,81
0	05:10:00	0,07	0,07	0,12	0,3	0,4	0,78
0	05:15:00	0,07	0,07	0,11	0,29	0,38	0,75
0	05:20:00	0,06	0,07	0,1	0,28	0,37	0,72
0	05:25:00	0,06	0,06	0,1	0,27	0,35	0,69
0	05:30:00	0,06	0,06	0,09	0,26	0,34	0,67
0	05:35:00	0,06	0,06	0,08	0,25	0,33	0,65
0	05:40:00	0,06	0,06	0,08	0,24	0,31	0,62
0	05:45:00	0,05	0,05	0,07	0,23	0,3	0,6
0	05:50:00	0,05	0,05	0,07	0,22	0,29	0,58
0	05:55:00	0,05	0,05	0,07	0,21	0,28	0,56
0	06:00:00	0,05	0,05	0,06	0,2	0,27	0,54
0	06:05:00	0,05	0,05	0,06	0,19	0,25	0,53
0	06:10:00	0,05	0,05	0,06	0,18	0,24	0,51
0	06:15:00	0,04	0,05	0,05	0,17	0,23	0,49
0	06:20:00	0,04	0,04	0,05	0,17	0,23	0,48
0	06:25:00	0,04	0,04	0,05	0,16	0,22	0,46
0	06:30:00	0,04	0,04	0,04	0,15	0,21	0,45
0	06:35:00	0,04	0,04	0,04	0,14	0,2	0,43
0	06:40:00	0,04	0,04	0,04	0,14	0,19	0,42
0	06:45:00	0,04	0,04	0,04	0,13	0,18	0,41
0	06:50:00	0,04	0,04	0,04	0,13	0,17	0,39
0	06:55:00	0,04	0,04	0,03	0,12	0,17	0,38
0	07:00:00	0,03	0,03	0,03	0,11	0,16	0,37
0	07:05:00	0,03	0,03	0,03	0,11	0,15	0,36
0	07:10:00	0,03	0,03	0,03	0,1	0,15	0,35
0	07:15:00	0,03	0,03	0,03	0,1	0,14	0,34
0	07:20:00	0,03	0,03	0,03	0,09	0,13	0,33

0	07:25:00	0,03	0,03	0,03	0,09	0,13	0,32
0	07:30:00	0,03	0,03	0,02	0,08	0,12	0,31
0	07:35:00	0,03	0,03	0,02	0,08	0,12	0,3
0	07:40:00	0,03	0,03	0,02	0,08	0,11	0,29
0	07:45:00	0,03	0,03	0,02	0,07	0,11	0,28
0	07:50:00	0,03	0,03	0,02	0,07	0,1	0,28
0	07:55:00	0,03	0,03	0,02	0,07	0,1	0,27
0	08:00:00	0,03	0,03	0,02	0,06	0,09	0,26
0	08:05:00	0,03	0,03	0,02	0,06	0,09	0,25
0	08:10:00	0,02	0,02	0,02	0,06	0,08	0,24
0	08:15:00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,08	0,24
0	08:20:00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,07	0,23
0	08:25:00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,07	0,22
0	08:30:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,07	0,22
0	08:35:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,21
0	08:40:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,2
0	08:45:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,2
0	08:50:00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,19
0	08:55:00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,19
0	09:00:00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05	0,18
0	09:05:00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05	0,18
0	09:10:00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,04	0,17
0	09:15:00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,04	0,17
0	09:20:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,16
0	09:25:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,04	0,16
0	09:30:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,15
0	09:35:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,15
0	09:40:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,14
0	09:45:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,14
0	09:50:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,14
0	09:55:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,13
0	10:00:00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,13
0	10:05:00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12

0	10:10:00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12
0	10:15:00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,12
0	10:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,11
0	10:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,11
0	10:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,11
0	10:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,1
0	10:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,1
0	10:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1
0	10:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09
0	10:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09
0	11:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09
0	11:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09
0	11:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	11:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	11:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	11:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
0	11:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	11:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	11:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	11:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
0	11:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	11:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	12:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	12:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	12:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
0	12:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:35:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:40:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
0	12:45:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	12:50:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04

0	12:55:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	13:00:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	13:05:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	13:10:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
0	13:15:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	13:20:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	13:25:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	13:30:00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0	13:35:00	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,03
0	13:40:00	0,01	0,01	0	0	0,01	0,03
0	13:45:00	0,01	0,01	0	0	0,01	0,03
0	13:50:00	0,01	0,01	0	0	0,01	0,03
0	13:55:00	0,01	0,01	0	0	0,01	0,03
0	14:00:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:05:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:10:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:15:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:20:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:25:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:30:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:35:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:40:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:45:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:50:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	14:55:00	0,01	0,01	0	0	0	0,02
0	15:00:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:05:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:10:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:15:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:20:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:25:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:30:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:35:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01

0	15:40:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:45:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:50:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	15:55:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:00:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:05:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:10:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:15:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:20:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:25:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:30:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:35:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:40:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:45:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01
0	16:50:00	0,01	0,01	0	0	0	0,01

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE E

Report Summary SWMM – Estação Cercadinho

Tabela 04 - Nós de enchentes estação cercadinho

Node Flooding						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Volume 1000 m ³
G53	12.33	33466.43	3	01:10	539.569	0.000
G51	0.01	1965.08	3	01:09	0.044	0.000
G29	23.57	5459.55	23	12:19	216.078	0.000
G25	19.28	19417.01	23	04:30	737.984	0.000
G23	7.59	7565.67	23	04:30	83.660	0.000
G28	21.67	6226.66	23	11:24	182.460	0.000
G31	1.61	1541.63	23	13:27	2.160	0.000
PV1C	2.50	7095.80	24	00:08	8.280	0.000
G32	1.31	1051.34	24	01:40	1.968	0.000
G46	6.00	13439.10	24	00:30	129.588	0.000
PV1E	6.07	17128.49	24	00:33	186.006	0.000
TRANSG70	0.32	1070.71	26	18:28	0.597	0.000
G12	7.38	15905.69	28	00:11	205.220	0.000
4038	1.84	16382.62	28	00:30	62.161	0.000
G40	1.54	18618.64	28	00:30	56.728	0.000
PV1B	2.47	48239.10	28	01:30	185.970	0.000
G65	16.54	29352.45	28	01:05	600.392	0.000
G6	1.61	20444.01	28	00:30	58.573	0.000
5414	13.03	51535.39	28	00:30	487.497	0.000

G7	1.17	10029.25	28	01:18	18.062	0.000
G8	1.18	6126.27	28	01:32	10.928	0.000
4891	0.57	5628.02	28	00:30	6.316	0.000
G70	0.28	3999.79	28	00:07	0.862	0.000
G11	0.01	364.84	28	00:11	0.007	0.000
G64	3.33	14869.00	28	00:07	69.645	0.000
G43	2.72	14221.66	28	01:14	68.066	0.000
G9	3.73	12104.81	28	01:09	68.321	0.000
G71	0.86	11814.05	28	00:07	18.043	0.000
G41A	1.62	10822.87	28	01:14	22.544	0.000

Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE F

Report Summary SWMM – Estação 42 PBH

Tabela 05 - Nós de enchentes estação 42 PBH

Node Flooding						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate LPS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Poned Volume 1000 m ³
G53	0.40	11921.26	335	21:31	9.672	0.000
G25	0.49	11444.84	335	21:31	10.754	0.000
G28	0.55	6061.33	335	21:23	5.577	0.000
G29	0.57	5373.72	335	21:16	5.191	0.000
5414	0.34	3711.63	335	21:30	1.812	0.000
G70	0.17	1874.71	335	21:28	0.398	0.000
G31	0.03	1174.87	335	21:40	0.079	0.000
G64	0.06	1157.40	335	21:30	0.153	0.000
G32	0.03	908.06	335	21:43	0.070	0.000
TRANSG70	0.14	722.17	335	21:26	0.176	0.000
G46	0.04	431.17	335	21:31	0.037	0.000

Fonte: Aatoria própria (2025).