



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

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA BACIA DE  
DETENÇÃO NO Córrego do Cercadinho**

**Sinderley Macedo Dias**

**Belo Horizonte**

**2025**

**Sinderley Macedo Dias**

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA BACIA DE  
DETENÇÃO NO CÓRREGO DO CERCADINHO**

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

Orientadora: Profa. Dra. Luciana Peixoto Amaral

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 10 / 2025 - DCTA (11.55.03)**

**Nº do Protocolo: 23062.038918/2025-69**

**Belo Horizonte-MG, 22 de julho de 2025.**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**

**SINDERLEY MACEDO DIAS**

### **SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA BACIA DE DETENÇÃO NO CÓRREGO DO CERCADINHO**

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:

---

Luciana Peixoto Amaral – Presidente da Banca Examinadora

Prof<sup>a</sup>. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
Orientadora

---

Lilia Maria de Oliveira

Prof<sup>a</sup>. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
CEFET/MG

---

Frederico Keizo Odan

Prof. Dr. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais –  
CEFET/MG

*(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 19:15 )*

LILIA MARIA DE OLIVEIRA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DCTA (11.55.03)  
Matrícula: 1815815

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 17:45 )*

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: **10**, ano: **2025**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:  
**22/07/2025** e o código de verificação: **e017a92840**

## AGRADECIMENTOS

Após cinco anos de extrema dedicação e entrega em busca da conclusão do curso de engenharia Ambiental e Sanitária em uma das melhores instituições acadêmicas nacionais, este trabalho de conclusão de curso evidencia todos os sentimentos que tive durante toda a graduação.

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente aos meus pais, Milaine e Sinderley por não terem feito esforços para que durante este período eu tivesse todo conforto que estivesse ao seu alcance, proporcionando todo auxílio e motivação para que minha única preocupação fosse os estudos.

A minha amada Laura, minha principal apoiadora e colega de faculdade e de vida, que compartilhou diretamente comigo todas as aflições, ansiedades, e desespero durante todo trajeto acadêmico, também não posso deixar de agradecer por todos os momentos de alegria e felicidade que você me proporcionou durante a rotina no CEFET. Muito obrigado por me inspirar e apoiar sempre em minhas decisões.

A todos os profissionais e amigos que conheci durante a minha trajetória de estágios, em especial, o Luís Felipe, Marina Oliveira e Ana Letícia que são minha inspiração profissional, tenho uma responsabilidade gigante em ser um Engenheiro Ambiental como vocês foram para mim durante esta jornada. A dedicação e o empenho de vocês me motivam todos os dias em realizar os melhores relatórios e entregas. Muito obrigado por todo o apoio, terapias e momentos felizes

À minha orientadora, Luciana Peixoto, que me apresentou as melhores disciplinas na Graduação Agradeço todo comprometimento, orientação e ajuda para a realização deste trabalho, suas contribuições foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

DIAS, SINDERLEY. **Simulação Hidrológica da Implantação de uma bacia de retenção no Córrego do Cercadinho**. 2025. 78f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

A urbanização desordenada nos centros urbanos tem intensificado os problemas de drenagem urbana nos municípios brasileiros, Belo Horizonte/MG não foge dessa realidade que também apresenta enchentes e alagamentos nas principais vias no município. Diante disso o presente estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Córrego do Cercadinho, situada na região oeste do município de Belo Horizonte, como um exemplo representativo desse cenário, sendo severamente impactada por problemas de inundações e pela insuficiência de infraestrutura de escoamento pluvial. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia da implantação de uma bacia de retenção como técnica compensatória para o controle de cheias, por meio de simulações hidrológicas com uso do software HEC-HMS, integradas a ferramentas de geoprocessamento como o QGIS. O estudo foi conduzido a partir da caracterização física da bacia, análise do uso e ocupação do solo, dados pluviométricos e altimétricos, bem como definição da área de contribuição para a bacia de retenção, estimada em 2,39 km<sup>2</sup>. Com base nos dados hidrológicos processados, foram realizadas simulações para os cenários de área de implantação da bacia de retenção de 15.000 m<sup>2</sup>, 20.000m<sup>2</sup>, 30.000m<sup>2</sup> e 50.000m<sup>2</sup> com e sem a presença da bacia de retenção, permitindo avaliar a redução do pico de vazão e da mancha de inundação. Os resultados indicaram uma significativa atenuação do escoamento superficial, sendo que, para a área de 15.000 m<sup>2</sup>, obteve-se uma eficiência de 68 %, para 20.000 m<sup>2</sup> a eficiência foi de 76 % para 30.000 m<sup>2</sup> 85 % e, por fim no último cenário de área da bacia com área de 50.000 m<sup>2</sup>, a eficiência alcançou 92 %. Esses resultados demonstram que a bacia de retenção pode ser uma estrutura eficiente para mitigação das inundações presente na área da bacia do Cercadinho.

Palavras-Chave: Simulação Hidrológica. Bacia de Retenção. Drenagem Urbana. Inundações. HEC-HMS.

## ABSTRACT

DIAS, SINDERLEY. **Hydrological Simulation in the Implementation of a Detention Basin in the Cercadinho Stream**. 2025. 78 pages. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Uncontrolled urbanization in urban centers has intensified urban drainage problems in Brazilian municipalities. Belo Horizonte, Minas Gerais, is no exception, also experiencing flooding and waterlogging on the municipality's main roads. Therefore, this study was conducted in the Cercadinho Stream watershed, located in the western region of the municipality of Belo Horizonte, as a representative example of this scenario, severely impacted by flooding problems and insufficient stormwater drainage infrastructure. In this context, this work aimed to evaluate the effectiveness of implementing a detention basin as a compensatory flood control technique through hydrological simulations using HEC-HMS software, integrated with geoprocessing tools such as QGIS. The study was conducted based on the physical characterization of the basin, analysis of land use and occupation, rainfall and altimetry data, as well as the definition of the detention basin's contribution area, estimated at 2.39 km<sup>2</sup>. Based on the processed hydrological data, simulations were performed for detention basin area scenarios of 15,000 m<sup>2</sup>, 20,000 m<sup>2</sup>, 30,000 m<sup>2</sup>, and 50,000 m<sup>2</sup>, with and without the detention basin, allowing for an assessment of the reduction in peak flow and flood extent. The results indicated significant runoff attenuation, with an efficiency of 68% for the 15,000 m<sup>2</sup> area, 76% for the 20,000 m<sup>2</sup> area, 85% for the 30,000 m<sup>2</sup> area, and 92% for the last scenario, with a basin area of 50,000 m<sup>2</sup>. These results demonstrate that the detention basin can be an effective flood mitigation structure in the Cercadinho basin.

Keywords: Hydrological Simulation. Detention Basin. Urban Drainage. Flooding. HEC-HMS.

## **SUMÁRIO**

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Objetivo Geral</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos</b>	<b>15</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Conceitos Básicos de Hidrologia</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Impacto da urbanização no escoamento superficial</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Gestão da Drenagem Urbana em Belo Horizonte</b>	<b>22</b>
<b>3.4. Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbana</b>	<b>25</b>
3.4.1. Medidas de Controle do Escoamento Superficial	27
<b>3.5. Estudos Hidrológicos</b>	<b>31</b>
3.5.1. Hidrograma de Projeto	31
3.5.2. Tempo de Concentração	32
3.5.3. Determinação do escoamento superficial	34
<b>3.6. Estudos Hidráulicos</b>	<b>36</b>
<b>3.7. Modelos de Simulações Hidrológicas</b>	<b>39</b>
3.7.1. Modelo HEC-HMS	39
<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Localização da Área de Estudo</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Caracterização Física da Área de Estudo</b>	<b>48</b>
4.2.1. Aspectos Geomorfológicos	48
4.2.2. Altimetria e declividade	50
4.2.3. Pedologia	54
4.2.4. Uso e Ocupação do Solo	56

4.2.5.	Clima	58
4.2.6.	Pluviometria	58
<b>4.3.</b>	<b>Coleta e Tratamento dos Dados Hidrológicos</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelagem hidrológica</b>	<b>62</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Classificação de Horton e Strahler.....	18
Figura 3.2 – Características de um hidrograma tipo.....	20
Figura 3.3 – Impactos da urbanização desordenada.....	22
Figura 3.4 – Bacias hidrográficas em Belo Horizonte.....	24
Figura 3.5 – Bacia de detenção.....	29
Figura 3.6 – Bacia de retenção.....	30
Figura 3.7 – Parâmetros Geométricos e Hidráulicos de um canal.....	36
Figura 4.1 – Localização da Bacia do Cercadinho em Belo Horizonte.....	42
Figura 4.2 – Hidrografia da bacia.....	45
Figura 4.3 – Área de estudo para implementação da bacia de detenção.....	46
Figura 4.4 – Área de Contribuição.....	47
Figura 4.5 – Geomorfologia predominante na Bacia do Cercadinho e área de estudo.....	49
Figura 4.6 – Mapa Hipsométrico da Bacia do Cercadinho.....	51
Figura 4.7 – Curva de Nível da Bacia do Cercadinho.....	52
Figura 4.8 – Curvas de Níveis na área de estudo.....	53
Figura 4.9 – Tipos de solos predominantes na Bacia do Cercadinho e área de estudo.....	55
Figura 4.10 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Cercadinho.....	57
Figura 4.11 – Gráfico da distribuição da chuva.....	63
Figura 5.1 – Gráfico do Reservatório de 15.000 m <sup>2</sup> .....	65
Figura 5.2 – Gráfico do Reservatório de 20.000 m <sup>2</sup> .....	67
Figura 5.3 – Gráfico do Reservatório de 30.000 m <sup>2</sup> .....	68
Figura 5.4 – Gráfico do Reservatório de 50.000 m <sup>2</sup> .....	70

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Fórmulas empíricas para determinação do tempo de concentração. ....	32
Tabela 3.2 – Coeficiente de Manning para diferentes tipos de materiais. ....	37
Tabela 4.1 – Área Territorial dos Bairros do Município de Belo Horizonte inclusos na Bacia do Cercadinho. ....	43
Tabela 4.2 – Uso e cobertura do solo na bacia do Cercadinho. ....	56
Tabela 4.3 – Altura Pluviométrica (mm) na Mina Mutuca. ....	59
Tabela 4.4 – Parâmetros da área de contribuição. ....	60
Tabela 4.5 – Valores de CN obtidos para a área de contribuição. ....	61
Tabela 4.6 – Altura Pluviométrica (mm) para um tempo de retorno de 100 anos na Mina Mutuca. ....	62
Tabela 4.7 – Relação Cota x Volume em (x1.000 m <sup>3</sup> ). ....	64
Tabela 5.1 – Síntese dos resultados das simulações hidrológicas. ....	71

**LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APP	Área de Preservação Permanente
BH	Belo Horizonte
BHMAP	Sistema de Informações Geográficas de PBH
CN	Curve Number (Número da Curva do SCS)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HU	Hidrograma Unitário
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
QGIS	Quantum Geographic Information System
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SCS	Soil Conservation Service
SUDECAP	Superintendência de Desenvolvimento da Capital
TR	Tempo de Retorno

USACE

United States Army Corps of Engineers

## 1. INTRODUÇÃO

A urbanização crescente e desordenada nas grandes cidades tem sido um dos principais desafios enfrentados pela gestão urbana. O rápido crescimento populacional, aliado à expansão descontrolada das áreas urbanas, resulta na impermeabilização do solo, no desmatamento e na ocupação inadequada de regiões ribeirinhas. Esses fatores contribuem significativamente para a ocorrência de inundações, que têm impactos negativos tanto ambientais quanto socioeconômicos (Tucci, 2002).

No censo de 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Belo Horizonte (BH), localizado no estado de Minas Gerais – MG, registrou cerca de 2.315.560 de habitantes, representando uma queda de -2,53% comparado com o último censo de 2010. Vale ressaltar que o município de Belo Horizonte está localizado na região Sudeste, sendo esta região brasileira mais populosa comparada com as outras regiões no Brasil (Galdino, 2023).

As inundações em áreas urbanizadas estão diretamente associada aos processos de urbanização desordenado, principalmente pela impermeabilização do solo e pela expansão inadequada da infraestrutura de drenagem. O aumento das vazões de pico, a maior produção de sedimentos, a degradação da qualidade da água e a obstrução do escoamento por obras mal planejadas ou resíduos sólidos são impactos recorrentes em bacias urbanas, sobretudo aquelas de pequeno porte (Tucci, 2005a).

O córrego Cercadinho, localizado na região oeste de Belo Horizonte, sofre também com inundações nos bairros e vias localizados na delimitação da Bacia do Cercadinho, como foi mencionado pelo jornal O TEMPO, que noticiou o aumento do volume de água no córrego, na altura do bairro Buritis, causando inundações no comércio do bairro. (Menezes, 2020). Diante desse cenário, técnicas compensatórias, como bacias de retenção, são mostradas alternativas eficazes para mitigar os impactos das cheias e melhorar o manejo das águas pluviais em áreas urbanas.

A utilização de simulações hidrológicas e hidráulicas no planejamento de técnicas compensatórias, como bacias de retenção, apresenta-se como uma ferramenta indispensável para projetar soluções eficientes e baseadas em evidências. Este estudo busca não apenas

contribuir para melhorar a resiliência do sistema de drenagem urbana, mas também para a formulação de políticas públicas que priorizem o manejo integrado das águas pluviais e a adaptação às mudanças climáticas, promovendo maior resiliência urbana e sustentabilidade.

As soluções aplicadas para mitigar problemas de drenagem urbana muitas vezes apresentam um enfoque localizado, conforme destaca Canholi (2014). As intervenções pontuais reduzem os danos na região onde são implementadas, mas podem agravar a situação em áreas a jusante devido à transferência de vazões. Além disso, a drenagem urbana pode ser entendida como uma questão de planejamento e alocação de espaços.

Historicamente, as soluções convencionais de drenagem de águas pluviais foram desenvolvidas com base em concepções higienistas, priorizando a rápida remoção da água por meio de canalização e direcionamento aos corpos hídricos receptores. Essa abordagem, no entanto, tornou-se limitada diante do rápido crescimento urbano, evidenciando a ineficácia dos sistemas tradicionais ao apenas deslocar o problema das inundações para regiões adjacentes, sem uma solução definitiva e sustentável para a drenagem das águas pluviais (Silva, 2006).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar a eficácia de uma bacia de retenção de águas pluviais no controle de enchentes na bacia do Córrego do Cercadinho, em Belo Horizonte, por meio de modelagens hidrológicas associada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), analisando a redução de picos de vazão, o controle de inundações.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- Analisar a área potencial para implantação de bacia de retenção na região da bacia do Cercadinho;
- Avaliar, por meio de modelagem hidrológica, a vazão de pico após a implantação da bacia de retenção;

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Conceitos Básicos de Hidrologia**

A hidrologia é um ramo da ciência dedicado ao estudo da água na Terra, abrangendo sua ocorrência, distribuição, entrega e propriedades físicas e químicas. Além disso, analisa a interação da água com o meio ambiente e os ecossistemas, considerando os impactos das atividades humanas e os diferentes usos desse recurso essencial para a vida. A hidrologia também investiga a relação entre a água e as formas de vida que dela dependem, seja para consumo, produção de alimentos, geração de energia ou outras específicas. Esse campo de conhecimento é fundamental para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos, evitando problemas como escassez, poluição e eventos extremos, como enchentes e secas (Tucci, 2001).

O ciclo hidrológico é composto por seis processos básicos: evaporação, precipitação, infiltração, transpiração, escoamento superficial e escoamento subterrâneo. Esses processos ocorrem de forma concomitante, sem um início ou fim definido. A radiação solar e a gravidade desempenham papéis fundamentais na formação do escoamento superficial. Quando a chuva atinge solo, parte da água pode se infiltrar no terreno, enquanto o restante escoar segue a ação da gravidade. O escoamento superficial é influenciado pela intensidade das chuvas, pela cobertura vegetal e pela permeabilidade do solo, fatores que afetam sua dinâmica e comportamento (Naghettini, 2012).

Ainda de acordo com o autor anterior, as características comumente medidas dos processos básicos do ciclo hidrológico encontram-se apresentadas no Quadro 3-1.

**Quadro 3-1 – Dados hidrológicos.**

<b>Variável</b>	<b>Características</b>	<b>Unidade</b>
Precipitação	Altura Intensidade Duração	mm, cm mm/h H, min
Evaporação/ETP	Intensidade Total	mm/dia, mm/mês mm, cm
Infiltração	Intensidade Altura	mm/h mm, cm
Escoamento Superficial	Vazão Volume Altura equivalente (Deflúvio)	l/s, m <sup>3</sup> /s m <sup>3</sup> , 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> , (m <sup>3</sup> /s).mês mm ou cm sobre uma área
Escoamento Subterrâneo	Vazão Volume	l/min, l/h, m <sup>3</sup> /dia m <sup>3</sup> , 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>

Fonte – Adaptado de Caseiro, Piveli e Sobrinho (2006).

O processo hidrológico apresentado, ocorre de forma integrada dentro da bacia hidrográfica. De acordo com Tucci (1997), bacia hidrográfica tem como definição toda área de captação natural de água provindo da precipitação, onde consiste em uma rede de drenagem, composta por cursos d'água interligados que convergem em uma única direção ao exultório principal.

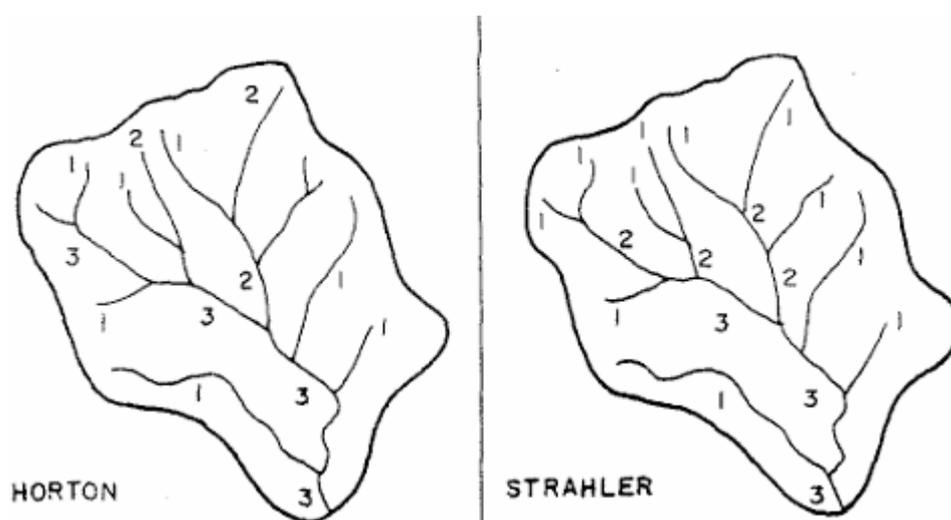
A bacia hidrográfica pode ser compreendida também como áreas da superfície terrestre, delimitadas pelo diviso de água, a partir dos quais o escoamento superficial e subterrâneo das águas pluviais é direcionado, pela ação da gravidade, para regiões com baixo relevo (Piroli,2022).

De acordo com Naghettini (2012), o rio principal de uma bacia hidrográfica é geralmente aquele com maior comprimento e identificado em mapas topográficos por meio do uso de curvímetros. A rede de drenagem de uma bacia é composta pelo rio principal e seus tributários, podendo ser classificada de diferentes formas. Dentre essas, destaca-se a classificação proposta por Strahler, que aprimorou a metodologia de Horton, tornando-a mais objetiva e amplamente aceita na análise de redes de drenagem no meio acadêmico.

A classificação pioneira foi proposta por Horton, que define que os cursos d'água sem tributários são classificados como rios de primeira ordem. Quando dois rios de primeira ordem se encontram, formam um curso de segunda ordem, e assim sucessivamente, com a concentração de rios de mesma ordem gerando o próximo nível hierárquico. Além disso, Horton explicou uma relação significativa entre a ordem de um rio e seu comprimento. Posteriormente,

Strahler revisou essa metodologia, eliminando a etapa que associava a ordem mais alta ao rio de maior comprimento, o que tornou o sistema mais simples e amplamente adotado para a análise de redes de drenagem de acordo com a Figura 3.1.

**Figura 3.1** – Classificação de Horton e Strahler.



Fonte: Adaptado de Tucci, 2005a.

Segundo Naghettini (2012), uma bacia hidrográfica é um sistema que integra os subsistemas de relevo e drenagem. Quando ocorre uma precipitação sobre a área da bacia, apenas uma parte dessa chuva que é denominada de precipitação efetiva contribui para o escoamento superficial. Essa água escoou pela superfície do terreno, conduzida pela gravidade em direção aos vales, formando córregos, riachos e rios. O volume de água que se movimenta nesses cursos d'água é chamado de vazão ou descarga que apresenta variação ao longo do tempo.

De acordo com Tucci (2005), o período de retorno ou tempo de retorno é o inverso da probabilidade, ou seja, a probabilidade de ocorrências de um determinado valor de vazão ou escoamento superficial em um determinado intervalo de tempo é inversamente proporcional ao período de retorno, sendo calculado pela equação (3-1).

$$T = \frac{1}{p} \quad (3-1)$$

na qual:

T = Período de Retorno (anos)

P = Probabilidade de ocorrência (%)

O escoamento superficial em uma bacia hidrográfica possui um tempo de concentração, que é definido como o intervalo de tempo necessário para que uma gota de chuva, ao atingir o ponto mais distante da bacia, percorra o trajeto até o exutório (ponto de saída da bacia), ou seja, o período necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua com a vazão na seção de saída. Em outras palavras, é o tempo necessário para que toda a bacia contribua com o escoamento superficial em direção ao exutório a partir do início da precipitação efetiva (SOUZA PINTO, 1976).

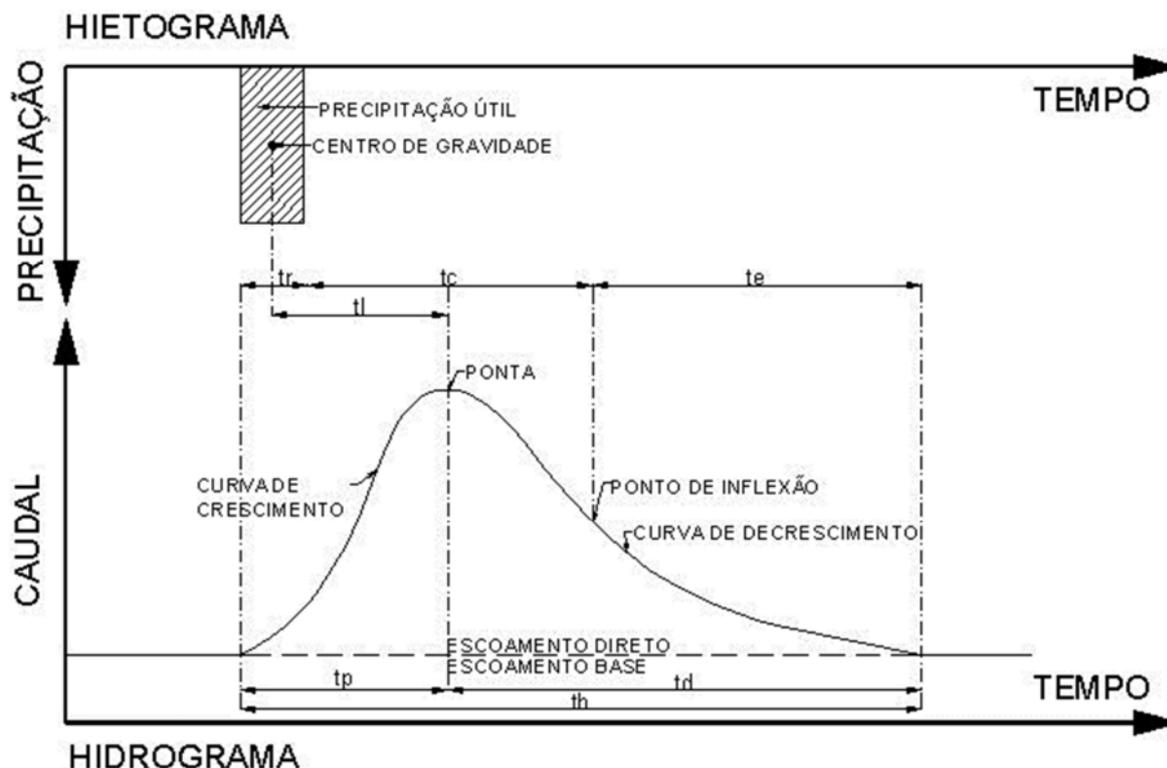
Esse conceito baseia-se na suposição de que a bacia responde de forma linear ao escoamento superficial, atingindo um estado de equilíbrio quando há uma precipitação efetiva de intensidade constante e um escoamento superficial direto resultante desse processo (LOPES DA SILVEIRA, 2005).

Um hidrograma gerado por uma chuva intensa geralmente exibe uma curva com um único pico. No entanto, em situações em que há mudanças bruscas na intensidade da precipitação, ocorrência de chuvas sucessivas ou uma recessão atípica do escoamento de intensidade, o hidrograma pode apresentar múltiplos picos ao longo do tempo (PORTO, ZAHED FILHO e MARCELLINI, 1999).

O hidrograma é composto por diferentes fases que descrevem a variação do escoamento ao longo do tempo. A curva de crescimento representa o aumento da vazão devido ao acréscimo do escoamento superficial, ocorrendo durante o período de crescimento até atingir o pico máximo. O ponto de maior vazão no hidrograma corresponde ao seu ápice. Em seguida, uma curva de decréscimo caracteriza a redução gradual do escoamento direto. A soma dos períodos de crescimento e decréscimo define o tempo total de base do hidrograma (Quintela, 1996).

Por fim, o conceito de curva de esgotamento representa a fase final, marcada pela diminuição exponencial do escoamento de base, após a interrupção das contribuições dos demais componentes do escoamento superficial (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Características de um hidrograma tipo.



Fonte: Quintela, 1996.

### 3.2. Impacto da urbanização no escoamento superficial

Urbanização é o processo de crescimento e transformação de áreas rurais em áreas urbanas, caracterizado pelo aumento da população que vive nas cidades e pela expansão de infraestrutura, como moradias, redes de transporte, serviços públicos e áreas industriais. Isso geralmente ocorre devido a fatores como migração em busca de melhores oportunidades de emprego, acesso a serviços de saúde e educação, e maior oferta de atividades econômicas nas cidades (Tucci, 2002).

A urbanização no Brasil se intensificou significativamente a partir da segunda metade do século XX, com um aumento expressivo da população vivendo em áreas urbanas entre 1950 e 2010. Esse crescimento, embora frequentemente relacionado ao progresso, também gera consequências ambientais que, na maioria das vezes, impactam diretamente a qualidade de vida da população (DRUMOND, 2012; VILLANUEVA *et al.*, 2011).

De acordo com Tucci (2012), a expansão urbana no Brasil tem se concentrado, sobretudo, em regiões metropolitanas e grandes cidades que funcionam como polos regionais. Esse crescimento ocorre de maneira desorganizada e com planejamento insuficiente, mesmo com a exigência legal dos Planos Diretores Urbanos. Na Figura 3.3 é apresentados os impactos ambientais resultantes da ocupação desordenada nas áreas urbanas, conforme apontado pelo autor.

As inundações também são um impacto resultante da urbanização, mas devem ser divididas entre: inundações ribeirinhas, que são um processo natural onde as cheias fazem com que o rio passe a ocupar não só seu leito menor, mas também o leito maior, e as inundações decorrentes da urbanização, que são resultantes do aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização, à ocupação do solo e à canalização de cursos d'água (Tucci, 2012).

A urbanização desordenada desempenha um papel significativo no aumento das inundações, e um de seus principais impactos é a canalização dos rios. A impermeabilização do solo e a ocupação irregular das margens agravaram ainda mais a situação, contribuindo para enchentes mais frequentes e intensas. Embora as inundações ribeirinhas ocorram naturalmente durante períodos de cheia, aquelas relacionadas à urbanização são resultado direto das intervenções humanas no meio ambiente (Tucci, 2002).

**Figura 3.3** – Impactos da urbanização desordenada.



Fonte: Adaptado de Tucci, 2012.

A inundação é um dos desastres naturais mais frequentes no Brasil, sendo influenciada por fatores como a urbanização desordenada e a impermeabilização do solo. Esse tipo de desastre ambiental é comum durante períodos de chuvas intensas, quando a vazão de rios e córregos em seus canais naturais aumenta significativamente. (Kobiyama et al., 2006).

### 3.3. Gestão da Drenagem Urbana em Belo Horizonte

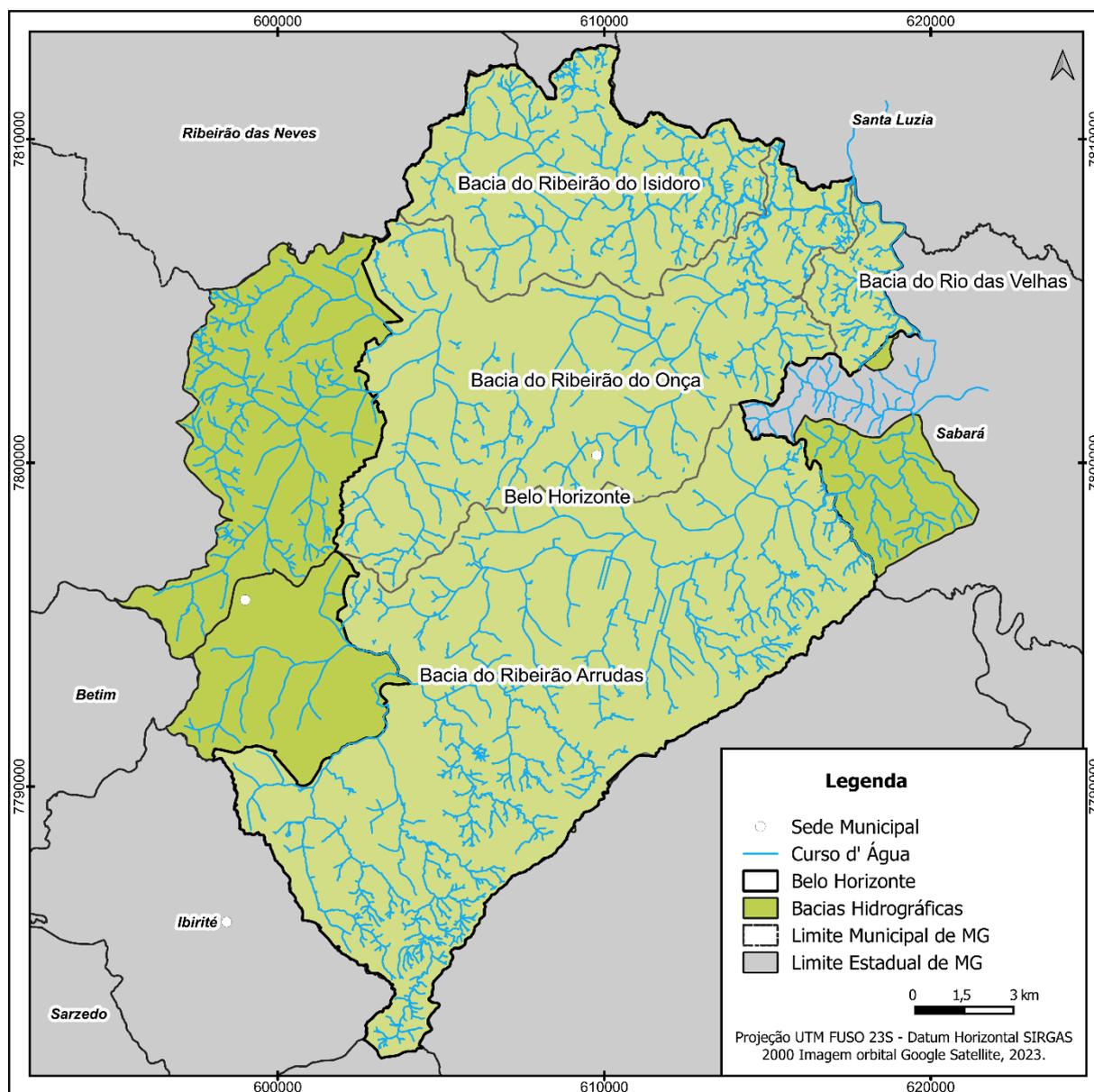
O crescimento acelerado das grandes metrópoles tem gerado desafios importantes para a gestão da drenagem urbana, especialmente quando essa questão não é integrada ao planejamento urbano desde o início. Em diversas cidades, tanto no Brasil quanto no exterior, a evolução foi historicamente tratada de forma secundária, atrelada ao parcelamento do solo, o que resultou em impactos negativos, como inundações ocasionais e comprometimento da qualidade da água. (Canholi, 2004).

A Prefeitura de Belo Horizonte (2022) define as medidas estruturais em drenagem urbana como intervenções físicas nas áreas afetadas, sendo elas obras de engenharia, destinadas a controlar ou melhorar o escoamento das águas pluviais. Essas intervenções podem atuar em medidas de controle na fonte ou distribuída e medidas de controle na microdrenagem e na macrodrenagem.

As medidas de controle de escoamento na microdrenagem são realizadas através do direcionamento das águas pluviais da área urbanizada por meio de condutos até um coletor principal ou curso d'água urbano. Contudo, essa abordagem transfere para jusante o aumento do escoamento superficial, intensificando sua velocidade devido ao menor tempo de deslocamento em comparação às condições naturais. Como consequência, essa solução pode gerar inundações nos sistemas de drenagem principais ou na macrodrenagem (SUDERHSA, 2002).

De acordo com o plano diretor do município de Belo Horizonte, o município conta com 4 (quatro) bacia hidrográficas, sendo elas: a Bacia do Ribeirão Arrudas, Bacia do Ribeirão do Isidoro, Bacia do Ribeirão do Onça e Bacia do Rio das Velhas, conforme apresentado na Figura 3.4 (PBH, 2019).

**Figura 3.4 – Bacias hidrográficas em Belo Horizonte.**



Fonte: Autor, 2025.

### 3.4. Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbana

A Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, atualizando o marco legal do setor e definindo novas regulamentações para sua implementação e desenvolvimento. Define drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, ou drenagem urbana, como sendo as atividades, infraestrutura e operações voltadas para a drenagem de águas pluviais, incluindo transporte, detenção ou retenção para controle de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas drenadas, além da limpeza e fiscalização.

Drenagem urbana refere-se aos conjuntos de medidas estruturais e não estruturais, destinadas ao manejo das águas pluviais em áreas urbanizadas, visando minimizar os impactos associados ao escoamento superficial. O manejo das águas pluviais em áreas urbanas deve ser planejado de forma integrada, considerando não apenas a eficiência hidráulica, mas também os aspectos ambientais e sociais, de modo a minimizar os impactos negativos nos corpos d'água e nas áreas habitadas (Tucci, 2001).

As redes de drenagem urbana são classificadas em microdrenagem e macrodrenagem, de acordo com sua escala e função. A microdrenagem compreende uma rede de captação distribuída, projetada para coletar e conduzir as águas pluviais em nível local, dentro de loteamentos ou áreas urbanizadas. Essa rede segue o traçado das vias e inclui elementos como pavimentos, sarjetas, bocas de lobo, galerias subterrâneas e pequenos canais, garantindo o direcionamento inicial do escoamento superficial (Miguez, 2016).

Os componentes da microdrenagem são dimensionados para realizar o escoamento da água até o seu desague por meio de condutos e canais espalhados pela mancha urbana associados ao sistema viário (Baptista, 2005).

Por outro lado, de acordo com Miguez (2016), a macrodrenagem refere-se a uma infraestrutura de maior porte, responsável por transportar volumes significativos de água. Esse sistema é composto pelos cursos d'água naturais, como rios e córregos, que desempenhavam essa função antes da urbanização, além de estruturas artificiais como canais, galerias amplas, diques e barragens. A macrodrenagem é essencial para conduzir a vazão acumulada da bacia hidrográfica até o corpo d'água final, complementando o sistema de drenagem urbana e mitigando riscos de alagamento.

Com o crescimento urbano e as mudanças no uso do solo, o controle da drenagem urbana tornou-se essencial para minimizar os impactos das inundações a jusante das bacias hidrográficas (SCHUELER, 1987). Esse cenário impulsionou o desenvolvimento de soluções inovadoras externas para a mitigação e compensação dos efeitos da urbanização, diferenciando-se das abordagens tradicionais de cunho higienista, sendo detalhado no Quadro 3-2 (NASCIMENTO e HELLER, 2005).

**Quadro 3-2 – Abordagens tradicionais e conceitos inovadores.**

<b>Higienismo</b>	<b>Conceitos inovadores</b>
Drenagem rápida das águas pluviais para transferências para jusante da bacia	Favorecimento à infiltração, ao armazenamento e ao aumento do tempo de percurso do escoamento
Redes subterrâneas, canalização de cursos d'água naturais	Valorização da presença da água na cidade, busca de menor interferência sobre o sistema natural de drenagem
Associação do sistema de drenagem ao sistema viário	Soluções técnicas multifuncionais: Sistema de drenagem associação a áreas verdes, terrenos de esporte, parque lineares e entre outros
Sistemas de drenagem gravitacional, não controlado, configuração fixa da rede	Sistema de drenagem controlado, possibilidade de alteração na configuração da rede de drenagem em tempo real
Concepção e dimensionamento do sistema segundo um nível de inundação	Concepção e dimensionamento segundo diferentes níveis de risco de inundação, para atender a objetivos diferenciados
Não analisa o sistema no contexto de eventos de tempos de retorno superiores aos de projeto	Avaliação da operação do sistema para eventos de tempos de retorno superiores aos de projeto, gestão de risco de inundação
Objetivos de saúde pública e de conforto no meio urbano	Preocupação com a garantia de condições adequadas de saúde pública e confronto no meio urbano e de redução dos impactos da urbanização sobre os meios receptores

Fonte: Adaptado de Nascimento e Heller (2005).

As estratégias para melhorar a qualidade da água e regular o volume de escoamento na drenagem podem ser divididas em duas categorias principais: medidas estruturais, que envolvem a construção de infraestruturas físicas para o controle do escoamento, e medidas não estruturais, que abrangem políticas, regulamentações e boas práticas para reduzir os impactos das inundações (Canholi, 2005).

A Prefeitura de Belo Horizonte (2022) define as medidas de controle estruturais em drenagem urbana como intervenções físicas nas áreas afetadas, sendo elas obras de engenharia, destinadas a controlar ou melhorar o escoamento das águas pluviais.

#### 3.4.1. Medidas de Controle do Escoamento Superficial

A urbanização altera significativamente o ciclo hidrológico natural, aumentando a impermeabilização do solo e reduzindo a infiltração da água das chuvas. Como consequência, há um aumento do escoamento superficial, o que pode resultar em inundações, erosão dos cursos d'água e deterioração da qualidade da água. O aumento do escoamento superficial, pode ser reduzido por meio de medidas de controle na fonte ou distribuída, medidas de controle na microdrenagem e na macrodrenagem, sendo detalhadas no Quadro 3-3 (TUCCI,1995).

**Quadro 3-3 – Medidas de controle do escoamento.**

	<b>Fonte ou Distribuída</b>	<b>Microdrenagem</b>	<b>Macro drenagem</b>
<b>Descrição</b>	Aumento de áreas de infiltração e percolação; Armazenamento temporário em reservatórios residências ou telhados.	Reservatórios de Detenção	Planejamento no Controle da macro drenagem; Canalização; Dique de Proteção; Reservatórios ou Parques Urbanos.

Fonte: Adaptado de Tucci, 2005a.

As Técnicas Compensatórias (TCs) surgem como uma abordagem sustentável para a transição urbana, considerando os impactos da urbanização no planejamento dos sistemas de escoamento. Essas técnicas devem ser integradas ao sistema de drenagem para favorecer a infiltração e o armazenamento das águas pluviais, prolongando seu tempo de permanência na bacia hidrográfica (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2005).

As medidas de controle estruturais, também chamadas de tecnologias compensatórias, podem ser classificadas em função de sua atuação na bacia hidrográfica como medidas de controle na fonte ou medidas de controle centralizado (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2005) ou de controle a jusante (URBONAS e STAHR, 1993).

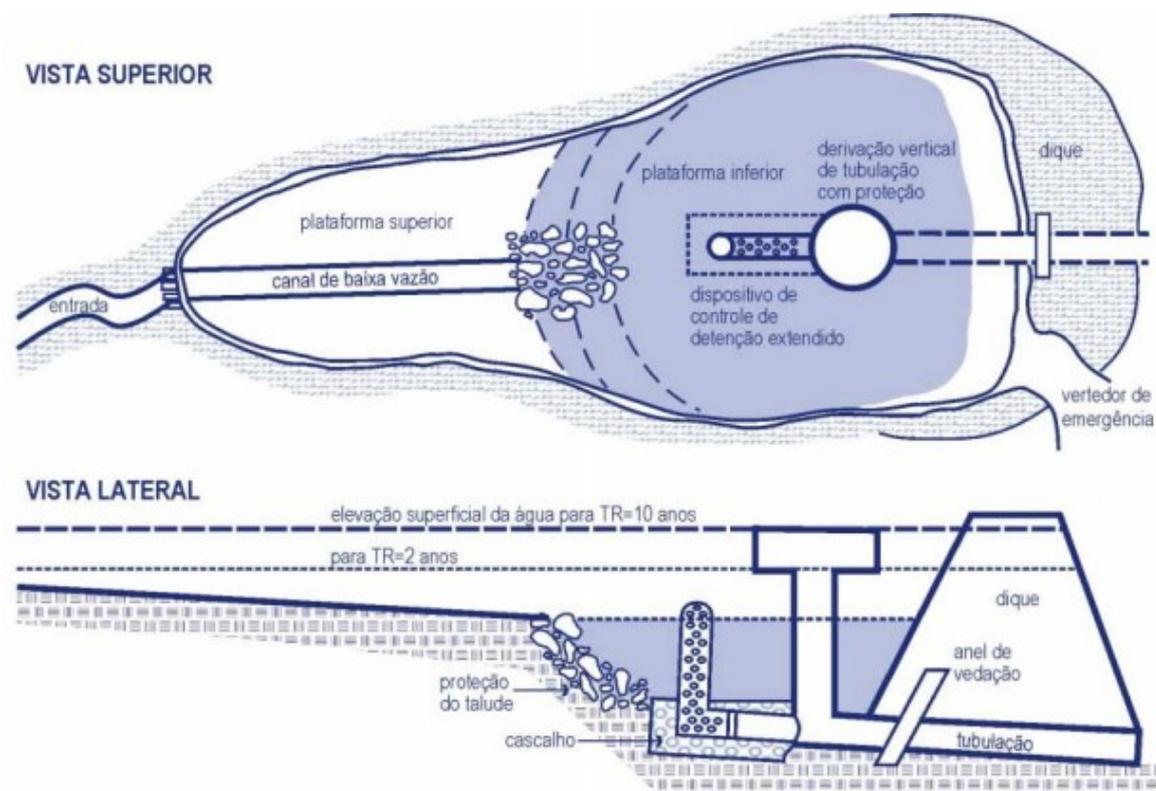
As medidas de controle na fonte ou distribuídas (TUCCI, 2007) referem-se ao controle da água de chuva diretamente na fonte produtora do escoamento superficial. Esses dispositivos atuam sobre lotes, praças, estacionamentos e empreendimentos de grande porte, podendo estar localizados em um ponto específico da bacia ou distribuídos. São geralmente de pequenas dimensões e têm a função de proporcionar infiltração e armazenamento da água.

A urbanização acelerada e desordenada produz um aumento do escoamento superficial, por conta da canalização dos rios e impermeabilização do solo. Diante do exposto, são necessárias medidas de controle do escoamento com o intuito de amortecer o volume gerado da precipitação por meio de dispositivos de controle a jusante da bacia (*downstream control*), como tanques, lagos e reservatórios (TUCCI, 1995).

As bacias de detenção (Figura 3.5), também conhecidas como reservatórios de detenção, são estruturas projetadas para acumular temporariamente as águas pluviais, reduzindo a velocidade do escoamento e contribuindo para a atenuação de cheias na bacia hidrográfica, sendo a medida de controle do escoamento adotada como objeto do presente estudo. Além desse tipo de bacia existe também bacia de retenção (Figura 3.6) que são dimensionados para manterem a lâmina permanente de água (SUDERHSA, 2002).

Essas estruturas podem variar em escala, desde grandes áreas destinadas ao armazenamento até reservatórios individuais de menor porte, implantados em lotes urbanos, denominados micro reservatórios domiciliares. Essas soluções fazem uso da infiltração e do armazenamento temporário como estratégias de controle do escoamento superficial, alinhando-se às técnicas compensatórias utilizadas no gerenciamento de drenagem urbana (CANHOLLI, 2005).

**Figura 3.5 – Bacia de detenção.**

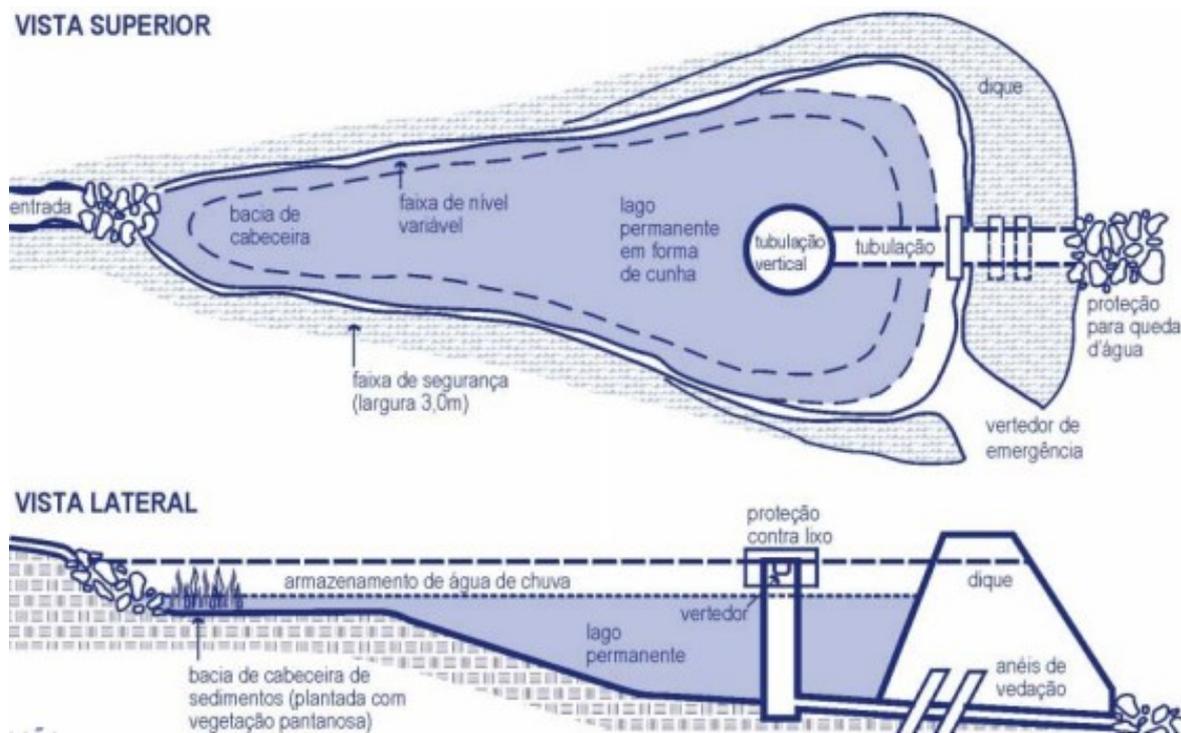


Fonte: Schuler (1987) *apud* SUDERHSA.

Nas áreas urbanas mais vulneráveis a problemas de drenagem, é fundamental que o poder público implemente estratégias para ampliar a capacidade de infiltração da água da chuva. Isso pode ser feito por meio da adaptação de espaços já existentes, como ruas, praças e parques, tornando-os mais permeáveis. Além disso, a construção de infraestruturas específicas, como bacias de detenção e retenção, contribui para o controle do escoamento superficial, reduzindo o risco de inundações e minimizando impactos ambientais. Essas ações são essenciais para promover um desenvolvimento urbano sustentável e equilibrado (Tucci, 2005a).

As medidas não estruturais têm características voltadas à prevenção e adaptação aos impactos das enchentes, abrangendo ações como o controle do uso e ocupação do solo em áreas vulneráveis, sistemas de alerta e previsão, educação ambiental e mecanismos de redução de riscos, como seguros contra enchentes. Ambas as medidas estruturais e não estruturais atuam em conjuntos para eficiência do sistema de drenagem (PINTO, 2011).

**Figura 3.6 – Bacia de retenção.**



Fonte: Schuler (1987) *apud* SUDERHSA.

### 3.5. Estudos Hidrológicos

#### 3.5.1. Hidrograma de Projeto

O Hidrograma Unitário (HU) representa o escoamento superficial direto gerado por uma chuva eficaz com intensidade e duração unitárias, onde uma área sob sua curva corresponde a um volume unitário de escoamento. Embora a definição de chuva unitária seja arbitrária, costuma-se adotar um padrão para comparações, como uma incidência de 1 mm com duração de 1 hora, assumindo sua distribuição uniforme sobre a bacia (PORTO, ZAHED FILHO e MARCELLINI, 1999).

Os autores definem esse método como amplamente utilizado para estabelecer a relação entre as previsões e o hidrograma resultante, sendo uma ferramenta prática na modelagem hidrológica. As informações encontradas com o HU são essenciais para a elaboração de hidrogramas de projeto, fundamentais no dimensionamento de estruturas hidráulicas como galerias de drenagem pluvial, bueiros rodoviários e ferroviários, vertedores de barragens e sistemas de controle de enchentes.

O Hidrograma Unitário é baseado em três princípios fundamentais. O primeiro é o tempo de base constante, que estabelece que chuvas de mesma duração geram períodos de escoamento superficial idênticos, independentemente do volume escoado, desde que a ocorrência seja distribuída de maneira uniforme sobre a bacia hidrográfica. O segundo princípio é o da proporcionalidade das vazões, que indica uma relação direta entre a altura da chuva e o volume escoado. Isso significa que, ao conhecer o hidrograma unitário para uma determinada duração de duração, é possível determinar o hidrograma para outra chuva de mesma duração, mas com intensidade diferente. O terceiro princípio é o da aditividade das vazões simultâneas, o que afirma que o escoamento direto gerado por uma chuva não é influenciado pelo escoamento proveniente de chuvas anteriores. Dessa forma, o hidrograma total pode ser obtido pela soma das ordenadas dos hidrogramas individuais correspondentes a cada chuva ocorrida no período específico (QUINTELA, 1996).

### 3.5.2. Tempo de Concentração

O tempo de concentração foi definido no item 3.1, onde foram apresentados diversos conceitos hidrológicos. A determinação do tempo de concentração é variável fundamental para a realização de estudos hidrológicos, sendo apresentado na literatura diversas equações empíricas, sendo apresentadas na Tabela 3.1 (LOPES DA SILVEIRA, 2005).

**Tabela 3.1** – Fórmulas empíricas para determinação do tempo de concentração.

Nome	Equação <sup>1</sup>	Fontes Bibliográficas
Izzard	$t_c = 85,5 \left( \frac{i}{36286 + C_r} \right) i^{0,667} L^{0,33} S^{-0,333}$	Pinto et al (1976) e Kibler (1982)
Kerby-Hathaway	$t_c = 0,619 N^{0,47} L^{0,47} S^{-0,235}$	McCuen (1984), Wanielista (1997)
Onda Cinem.	$t_c = 7,35 n^{0,6} i^{-0,4} L^{0,6} S^{-0,3}$	Porto (1995) e Kibler (1982)
FAA	$t_c = 0,37 (1,1 - C) L^{0,5} S^{-0,333}$	Porto (1995) e Kibler (1982)
Kirpich	$t_c = 23,38 \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,77}$	Porto (1995) e Kibler (1982)
SCS Lag	$t_c = 0,057 \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} L^{0,8} S^{-0,5}$	Porto (1995) e Kibler (1982)
Simas-Hawkins	$t_c = 0,322 A^{0,594} L^{-0,594} S^{-0,150} S_{SCS}^{0,313}$	Simas e Hawkins (1996)
Ven te Chow	$t_c = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$	DAEE (1978) e MOPU (1987)
Dooge	$t_c = 0,365 A^{0,41} S^{-0,17}$	Porto (1995) e USDA (1973)
Johnstone	$t_c = 0,462 L^{0,5} S^{-0,25}$	Tucci (1998) e USDA (1973)
Corps Engineers	$t_c = 0,191 L^{0,76} S^{-0,19}$	Linsley (1967) e MOPU (1987)
Giandotti	$t_c = 0,0559 (4,0 A^{0,5} + 1,5 L) L^{-0,5} S^{-0,5}$	Correia (1983) e MOPU (1987)
Pasini	$t_c = 0,107 A^{0,333} L^{0,333} S^{-0,5}$	Pfafstetter (1976)
Ventura	$t_c = 0,127 A^{0,5} S^{-0,5}$	Pfafstetter (1976)

<sup>1</sup>) Onde  $t_c$  é o tempo de concentração em h, A é a área da bacia em km, L é o comprimento do rio principal em km, S é a declividade média do rio principal em m/m,  $C_r$  é o coeficiente de Izzard,  $i$  é a intensidade da chuva em mm/h, N é um fator de retardo que varia em função da rugosidade,  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning, C é o parâmetro originado do método racional, CN é o parâmetro originado do método do número da curva do SCS,  $S_{scs}$  representa o armazenamento e é dado por  $(25400/CN)-254$ , k é um fator do método DNOS e é tabelado, p representa a fração de área com mata, Aimp é a fração de área impermeável, R é o raio hidráulico em m e  $\phi$  é o fator de condutância adimensional.

Nome	Equação <sup>1</sup>	Fontes Bibliográficas
Picking	$t_c = 0,0883 L^{0,667} S^{-0,333}$	Pinto et al. (1976)
DNOS	$t_c = 0,419 k^{-1} A^{0,3} L^{0,2} S^{-0,4}$	Mello (1973) e Ribeiro (1955)
George Ribeiro	$t_c = 0,222 (1,05 - 0,2p)^{-1} L S^{-0,04}$	Garcez (1967) e Ribeiro (1961)
Schaake et al.	$t_c = 0,0828 L^{0,24} S^{-0,16} A_{imp}^{-0,26}$	Schaake et al. (1967)
McCuen et al.	$t_c = 2,25 i^{-0,7164} L^{0,5552} S^{-0,2070}$	McCuen et al. (1984)
Carter	$t_c = 0,0977 L^{0,6} S^{-0,3}$	McCuen et al. (1984)
Eagleson	$t_c = 0,274 n R^{-0,67} L S^{-0,5}$	McCuen et al. (1984)
Desbordes	$t_c = 0,0869 A^{0,3039} S^{-0,3832} A_{imp}^{-0,4523}$	Desbordes (1974)
Espey-Winslow	$t_c = 0,343 \phi L^{0,29} S^{-0,145} A_{imp}^{-0,6}$	McCuen et al. (1984)

Fonte: Adaptado de Lopes da Silveira, 2005.

### 3.5.3. Determinação do escoamento superficial

Com a definição de hidrograma unitário de escoamento direto apresentado nos itens anteriores, torna-se possível calcular o volume de escoamento a partir de uma altura equivalente, que pode ser representada graficamente por meio do hietograma. Esse gráfico é construído com base na relação entre o tempo e a intensidade da ocorrência, permitindo visualizar a distribuição do volume escoado ao longo do evento chuvoso. Além disso, o hietograma possibilita a identificação de chuva excedente, ou seja, a parcela da chuva que ocorre gera escoamento superficial, excluindo a água que se infiltra no solo (PORTO, ZAHED FILHO e MARCELLINI, 1999).

Quintela (1996) apresenta que, para obter o hietograma de chuva excedente, é necessário calcular o volume de infiltração, que está diretamente relacionado às características locais, como o uso e a ocupação do solo, propriedades do solo (porosidade, umidade e cobertura vegetal) e os fatores ambientais, como a temperatura da água e o grau de compactação do solo.

Um dos métodos amplamente utilizados para estimar a infiltração é o do Número da Curva (CN), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS). Esse método define um coeficiente que representa a capacidade de infiltração do solo com base nas suas características e no uso da terra. O modelo classifica os solos em quatro grupos (A, B, C e D), sendo caracterizado cada solo no Quadro 3-4.

**Quadro 3-4 – Tipos de solo e condições de ocupação.**

<b>Grupo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Potencial de Infiltração</b>
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%. Não apresentam rochas nem camadas argilosas e não possuem camadas densificadas até 1,5 m de profundidade. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.	Alta taxa de infiltração e baixo escoamento superficial
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A, com teor de argila total inferior a 15%. Em solos de terras roxas, esse limite pode subir para 20%, devido à maior porosidade. O teor de húmus pode chegar a 1,2% ou 1,5%. Não deve conter pedras ou camadas argilosas até 1,5 m, mas frequentemente há uma camada mais densificada na superfície.	Infiltração moderada e alto escoamento superficial
C	Solos barrentos com teor de argila entre 20% e 30%, sem camadas argilosas impermeáveis ou presença de pedras até 1,2 m de profundidade. Em solos de terras roxas, os limites máximos podem chegar a 40% de argila e 1,5 m de profundidade. A partir de 60 cm, há uma camada mais densificada que no Grupo B, mas sem atingir impermeabilidade.	Infiltração moderada e baixo escoamento superficial
D	Solos argilosos com teor de argila entre 30% e 40%, apresentando uma camada densificada a cerca de 50 cm de profundidade. Possuem características semelhantes aos solos arenosos do Grupo B, mas com presença de camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.	Baixa infiltração e Maior escoamento Superficial

Fonte: Adaptado Tucci, Porto e Barros (1995).

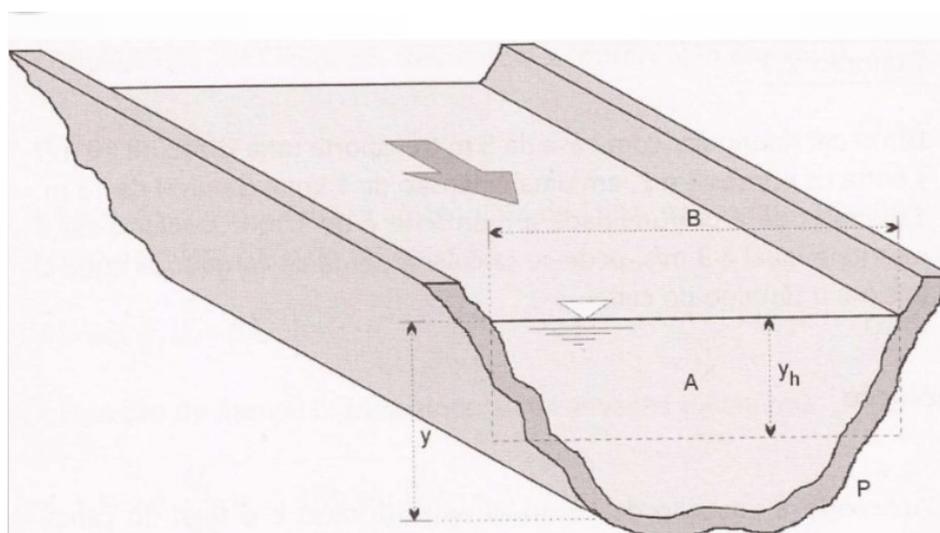
Com o grupo de solo definido para a área de estudo é necessário determinar o valor do CN (Número da Curva) conforme o tipo de uso do solo na região.

### 3.6. Estudos Hidráulicos

O funcionamento hidráulico de uma bacia de detenção ou retenção implica no regime hidráulico de escoamento em superfície livre, na qual a principal característica é a pressão atmosférica atuando sobre líquido no sentido da gravidade, em uma seção de geometria aberta (PORTO, 2006).

Os elementos geométricos e hidráulicos das seções de canais (Figura 3.7) são: Área molhada (A), Perímetro Molhado (P), Raio hidráulico ( $R_h$ ) Altura d'água (y), altura do escoamento (h), Largura de topo (B), Altura Hidráulica ( $y_h$ ) e Declividade ( $I_0$ ).

**Figura 3.7** – Parâmetros Geométricos e Hidráulicos de um canal.



Fonte: BAPTISTA e LARA, 2010.

A fórmula de Manning é utilizada para realização de cálculos de vazão em canais artificiais ou naturais, sendo apresentada na equação 3-2 (BAPTISTA e LARA, 2010).

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I_0^{1/2} \quad 3-2$$

Na qual:

Q: Vazão no conduto livre ( $m^3/s$ );

n: Coeficiente de rugosidade de Manning;

A: Área molhada da seção (m<sup>2</sup>)

R<sub>h</sub>: Raio hidráulico da seção (m)

I<sub>0</sub>: Declividade do fundo do canal (m/m)

O coeficiente de Manning é determinado de forma empírica e está disponível em várias referências na literatura, para diferentes tipos de revestimento e condições do canal. Ele considera a rugosidade das superfícies onde o escoamento ocorre (PORTO, 2006).

De acordo com Deantoni (2019), o coeficiente de rugosidade de Manning possui diferentes valores, variando de acordo com o material (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2** – Coeficiente de Manning para diferentes tipos de materiais.

<b>Descrição do Material</b>	<b>Coeficiente de Manning “n”</b>
Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas	0,011
Tubos de cimento e de assentamento em perfeitas condições	0,012
Canais de cimento muito lisos, de dimensões limitadas, curvas com raios longos e água limpa	0,013
Canais de cimento lisos, de dimensões limitadas, curvas com raios médios e água não limpa	0,014
Canais de cimento lisos, de dimensões limitadas, curvas com raios pequenos e água não limpa	0,018
Canais de cimento rugoso, depósito no fundo, musgo nas paredes	0,020
Canais de alvenaria de pedregulhos bem construídos, sem urbanização e curvas de raio longo	0,025
Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes	0,030

---

<b>Descrição do Material</b>	<b>Coefficiente de Manning “n”</b>
Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou com erosões	0,035
Alvéolos naturais, cobertos de cascalho e vegetação	0,015
Alvenaria de tijolos com argamassa de cimento	0,012
Superfície de cimento alisado	0,015
Superfície de argamassa de cimento	0,014
Tubos em ferro fundido sem revestimento	0,013
Tubos de ferro fundido com revestimento	0,015
Tubos de ferro galvanizado	0,012
Tubos de PVC	0,012
Tubos de PEAD	0,012
Tubos de concreto	0,015

---

Fonte: Deantoni, 2019.

### 3.7. Modelos de Simulações Hidrológicas

A modelagem hidrológica tem sido utilizada em diversos estudos com a finalidade de interpretar fisicamente os processos dos escoamentos. Diante disso, Monte et al. (2015, *apud* BALLESTEROS et al., 2011; BONNIFAIT et al., 2009; GRIMALDI et al., 2013; PAZ et al., 2011; SARHADI, SOLTANI e MODARRES, 2012; SURIYA e MUDGAL, 2012) apresentam diversos autores que utilizam modelos hidrológicos para simular cenários futuros, alinhados também com a utilização de dados e ferramentas agregadas, como o sensoriamento remoto.

#### 3.7.1. Modelo HEC-HMS

Dentre os diversos modelos empregados em estudos hidrológicos, o HEC-HMS se destaca como um software projetado para a transformação chuva-vazão. Desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), vinculado ao Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), trata-se de um modelo discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico. Sua principal finalidade é auxiliar na modelagem hidrológica e simular o processo de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas. Além disso, conta com uma extensão que permite a integração com arquivos digitais gerados por Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (USACE, 2022).

Para entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica, a modelagem hidrológica utiliza seus dados fisiográficos como base para a análise. Dentre as diversas metodologias aplicáveis, o modelo HEC-HMS se destaca por sua capacidade de simular a transformação da precipitação em escoamento superficial, integrando múltiplos módulos hidrológicos, permitindo a avaliação detalhada dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia. As simulações no *software* são realizadas por meio de três componentes que são: o modelo da bacia hidrográfica, o modelo meteorológico e as especificações de controle. A simulação hidrológica retorna tipo de chuva-vazão em uma determinada área (BOITRAGO et al., 2023 *apud* USACE, 2022).

O modelo da bacia é o principal componente do HEC-HMS, representando fisicamente a bacia e fornecendo as principais características para simulação do escoamento superficial, como sub-bacias, rios, reservatórios, fontes, sumidouros, junções, depressões e derivações. O modelo meteorológico, por sua vez, é responsável pela representação das séries históricas dos

fenômenos climáticos sobre a bacia, como precipitação, evaporação e transpiração. A precipitação pode ser simulada no HEC-HMS por meio de sete métodos: *specifield hyetograph*, *gage weighting*, *inversedistance gage weighting*, *gridded precipitation*, *frequency storm*, *SCS storm* e *standart project storm*. Já as especificações de controle referem-se aos parâmetros definidos pelo usuário para controlar as simulações, permitindo a definição dos intervalos de duração e períodos de análise (USACE, 2022).

Na pesquisa desenvolvida por Chaves et al. (2022), realizou-se o estudo comparativo entre outros modelos hidrológicos para simulação de escoamento superficial. O modelo HEC-HMS apresentou-se eficaz para entender as dinâmicas das bacias hidrográficas, utilizando tanto dados simulados quanto observados. Esses modelos oferecem informações importantes que podem ser essenciais para apoiar a tomada de decisões no planejamento e gestão dos recursos hídricos de uma região específica.

## **4. METODOLOGIA**

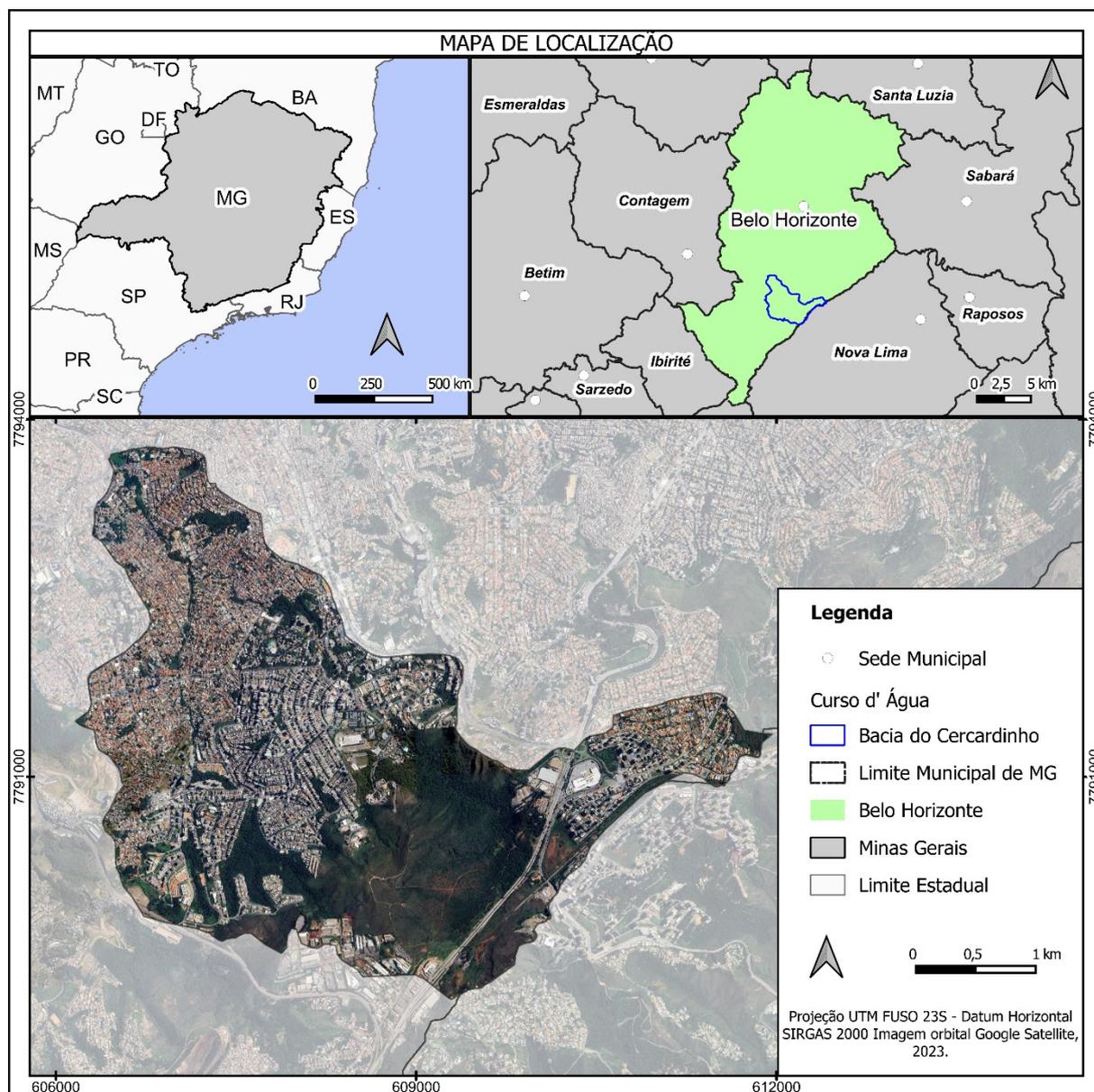
Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa descritivo-exploratória, de abordagem quantitativa, com o objetivo de avaliar a eficácia de uma bacia de retenção de águas pluviais no controle de enchentes. A metodologia envolve quatro etapas principais: 1) identificação e estudo da área de implantação da bacia, 2) coleta e tratamento de dados para a modelagem hidrológica, 3) utilização do software HEC-HMS para simular o comportamento hidrológico da bacia, e 4) análise da eficácia da bacia de retenção como medida mitigadora.

A pesquisa utilizou dados geoespaciais, meteorológicos e técnicos fornecidos por órgãos como Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como o software Quantum GIS para mapear a mancha de inundação gerada para bacia, com ou sem a presença da bacia de retenção.

### **4.1. Localização da Área de Estudo**

A primeira etapa da pesquisa consiste na realização do levantamento de dados relacionados à implantação da bacia de retenção no córrego Cercadinho, realizando a caracterização da bacia do Cercadinho e a identificação da área de estudo. Com uma população de cerca de 73.294 habitantes, a bacia hidrográfica do Córrego Cercadinho estende-se por 12,6 km<sup>2</sup>. Essa área corresponde a quase quatro por cento do território municipal (PBH, 2020). Na Figura 4.1 é apresentado o mapa de localização da bacia.

**Figura 4.1 – Localização da Bacia do Cercadinho em Belo Horizonte.**



Fonte: Autor, 2025.

Na Tabela 4-1 são listados os 15 bairros que compõem a bacia em estudo e suas respectivas áreas territoriais. Dentre eles, Buritis, Olhos d'Água, Havaí, Estoril e Belvedere possuem as maiores áreas dentro dessa bacia.

**Tabela 4.1** – Área Territorial dos Bairros do Município de Belo Horizonte inclusos na Bacia do Cercadinho.

<b>ID</b>	<b>Bairros</b>	<b>Área Territorial (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Territorial (%)</b>
1	Belvedere	1,707	14,1%
2	Bonsucesso	0,008	0,1%
3	Cinquentenário	0,694	5,7%
4	Mangabeiras	0,006	0,0%
5	Pilar	0,057	0,5%
6	Buritis	2,778	22,9%
7	Estoril	1,842	15,2%
8	Estrela do Oriente	0,006	0,0%
9	Havaí	1,613	13,3%
10	Olhos d'Água	2,256	18,6%
11	Palmeiras	0,87	7,2%
12	Salgado Filho	0,057	0,5%
13	Santa Lúcia	0,126	1,0%
14	São Domingos	0,005	0,0%
15	São José	0,083	0,7%
	<b>TOTAL</b>	<b>12,108</b>	<b>100%</b>

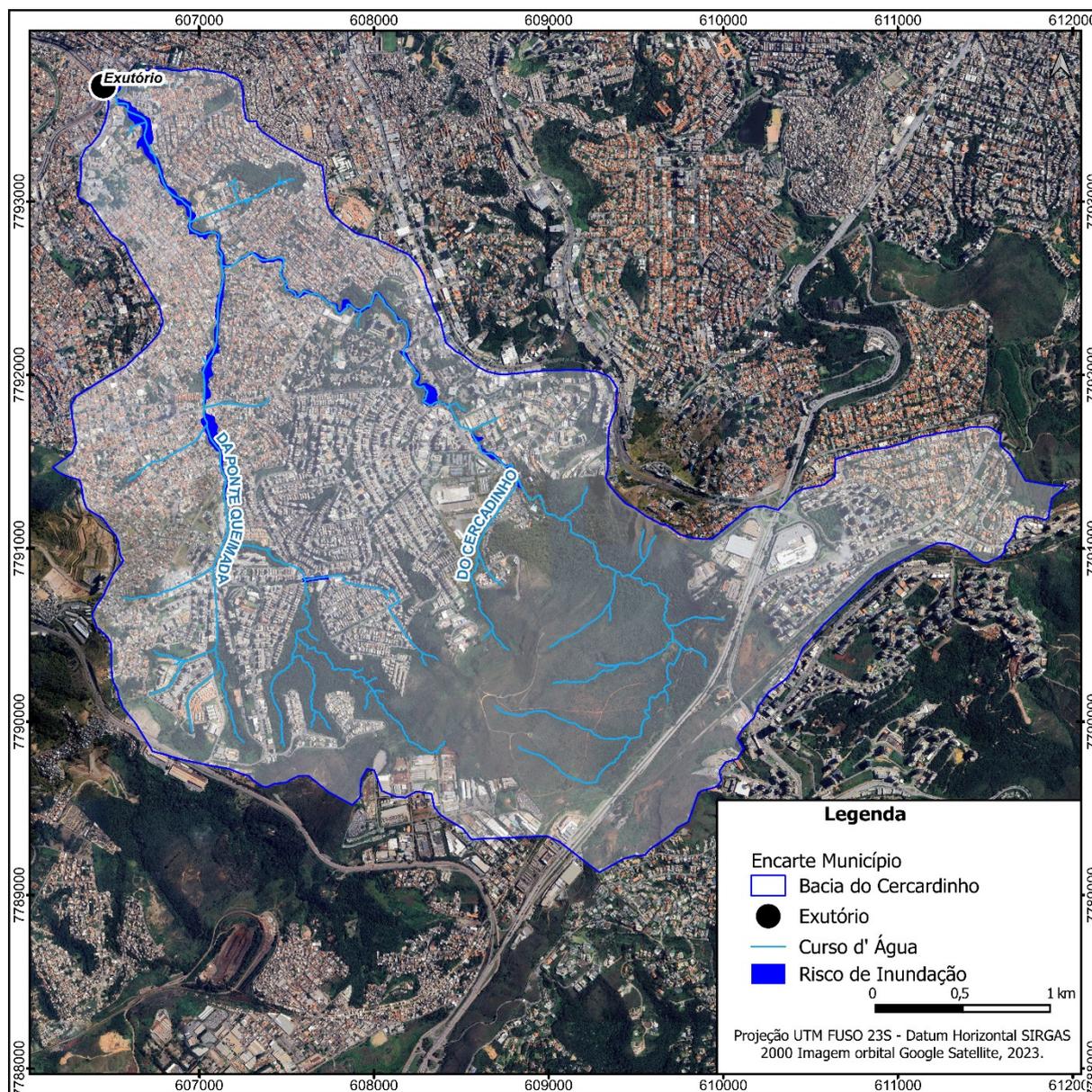
Fonte: BHMAP (2023).

Segundo Silva Oliveira (2023) a Bacia do Cercadinho está situada inteiramente no município de Belo Horizonte, a bacia hidrográfica é contornada pelas principais vias de acesso do município, sendo que ao norte e oeste pelas Avenidas Raja Gabágliá/Barão Homem de Melo, ao sul pela Avenida Tereza Cristina, a leste pelo Anel Rodoviário (BR-262) e, em parte, pelo limite com o município de Nova Lima.

A bacia do Cercadinho é caracterizada por dois cursos d'água principais: o Córrego do Cercadinho e seu afluente, o Córrego da Ponte Queimada. Este último, inclusive, forma uma sub-bacia em seu interior.

A topografia da bacia apresenta declividades que variam predominantemente entre 0% e 30%, as altitudes oscilam significativamente em cerca de 500 metros: desde 865 metros na foz – localizada na Avenida Tereza Cristina, ponto de encontro do Córrego do Cercadinho com o Ribeirão Arrudas – até 1.354 metros na porção mais elevada da bacia. Este ponto mais alto situa-se próximo à Serra do Curral, que atua como divisor de águas na divisa entre os municípios de Belo Horizonte e Nova Lima. Detalhes topográficos e hidrológicos da bacia são apresentados na Figura 4.2.

**Figura 4.2 – Hidrografia da bacia.**



Fonte: Autor, 2025.

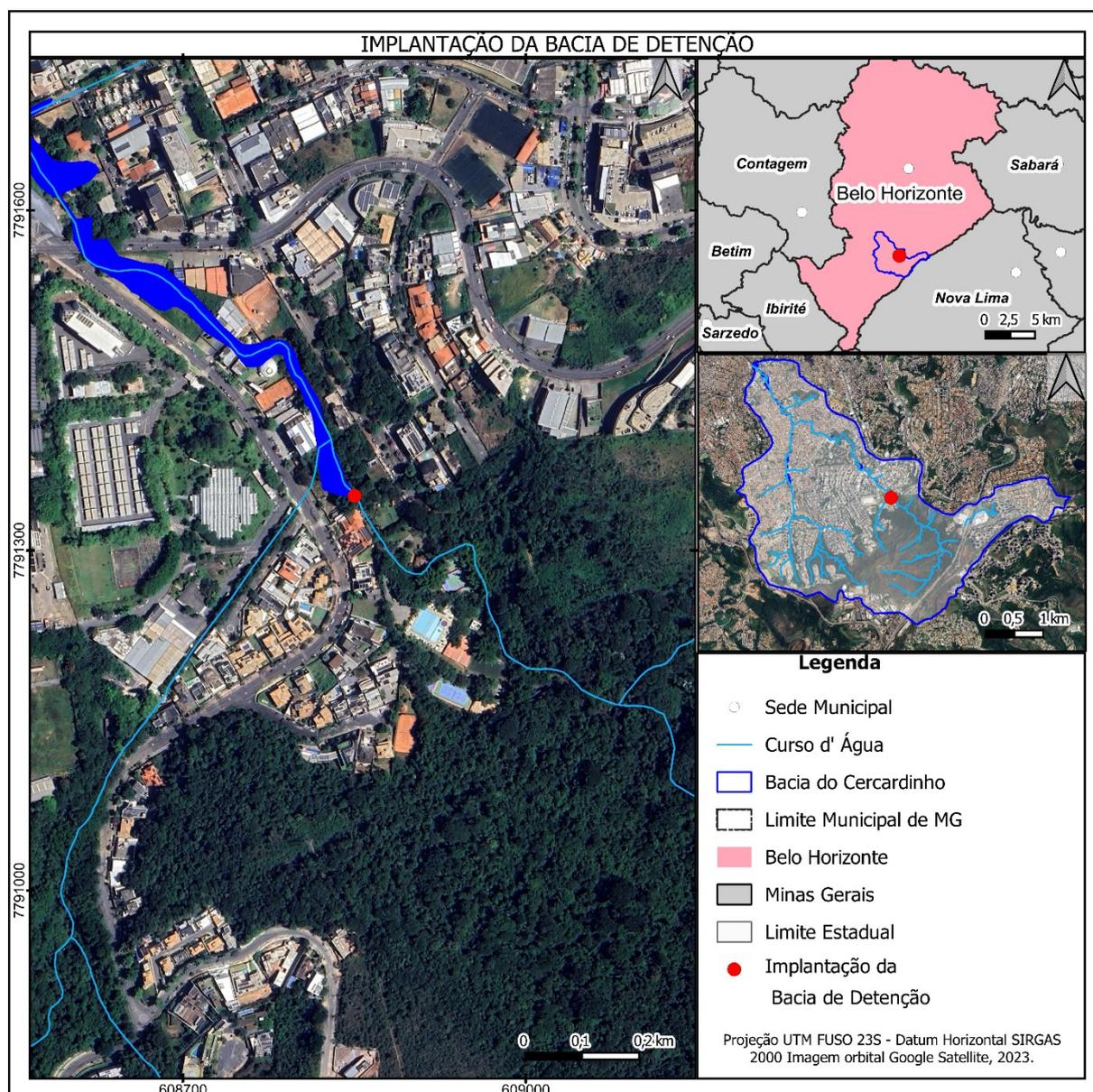
A disponibilidade de dados e informações previamente levantadas por meio dos mapas da Prefeitura de Belo Horizonte (BHMAP), de notícias e reportagens relacionadas a este tipo de eventos de inundações presentes no município, contribuiu para a caracterização da área e auxiliou na definição do local para a implementação da estrutura de controle hídrico.

Com base nos dados disponibilizados pelo Projeto Águas no Cercadinho, que incluem a hidrografia da bacia e as áreas com risco de inundação, foi realizada uma análise espacial

integrada da região, representada na Figura 4.2. A partir dessa análise, foi possível identificar um local potencial para a implantação de uma bacia de detenção, definido como estratégico para a mitigação direta da mancha de inundação que afeta a bacia do Cercadinho.

A Figura 4.3 apresenta o local de implantação da bacia de detenção, para o desenvolvimento do presente estudo.

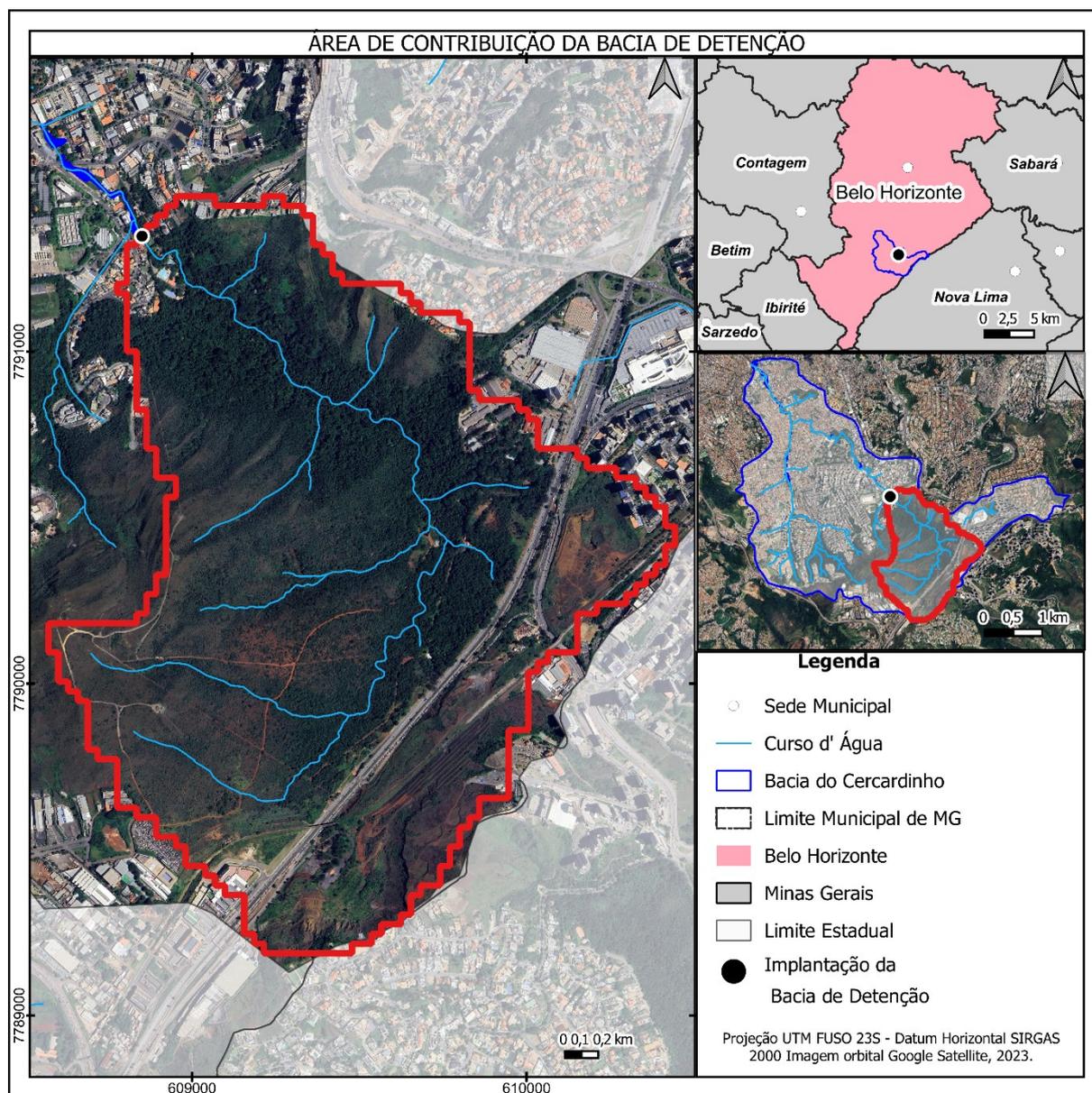
**Figura 4.3** – Área de estudo para implementação da bacia de detenção.



Fonte: Autor, 2025.

Com a identificação do local de implantação da bacia de detenção deu-se início aos estudos para a determinação da área de contribuição, utilizando as ferramentas do GRASS no Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir dos dados do TOPODATA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011). A Figura 4.4 apresenta a área de contribuição da bacia de detenção.

Figura 4.4 – Área de Contribuição



Fonte: Autor, 2025.

Vale ressaltar que a delimitação da bacia de contribuição, representada pela linha vermelha na Figura 4.4, foi realizada exclusivamente com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) do

terreno. Dessa forma, este trabalho adota como referência apenas a delimitação natural da área de estudo, obtida a partir das curvas de nível, sem a utilização de limites artificiais ou administrativos.

## **4.2. Caracterização Física da Área de Estudo**

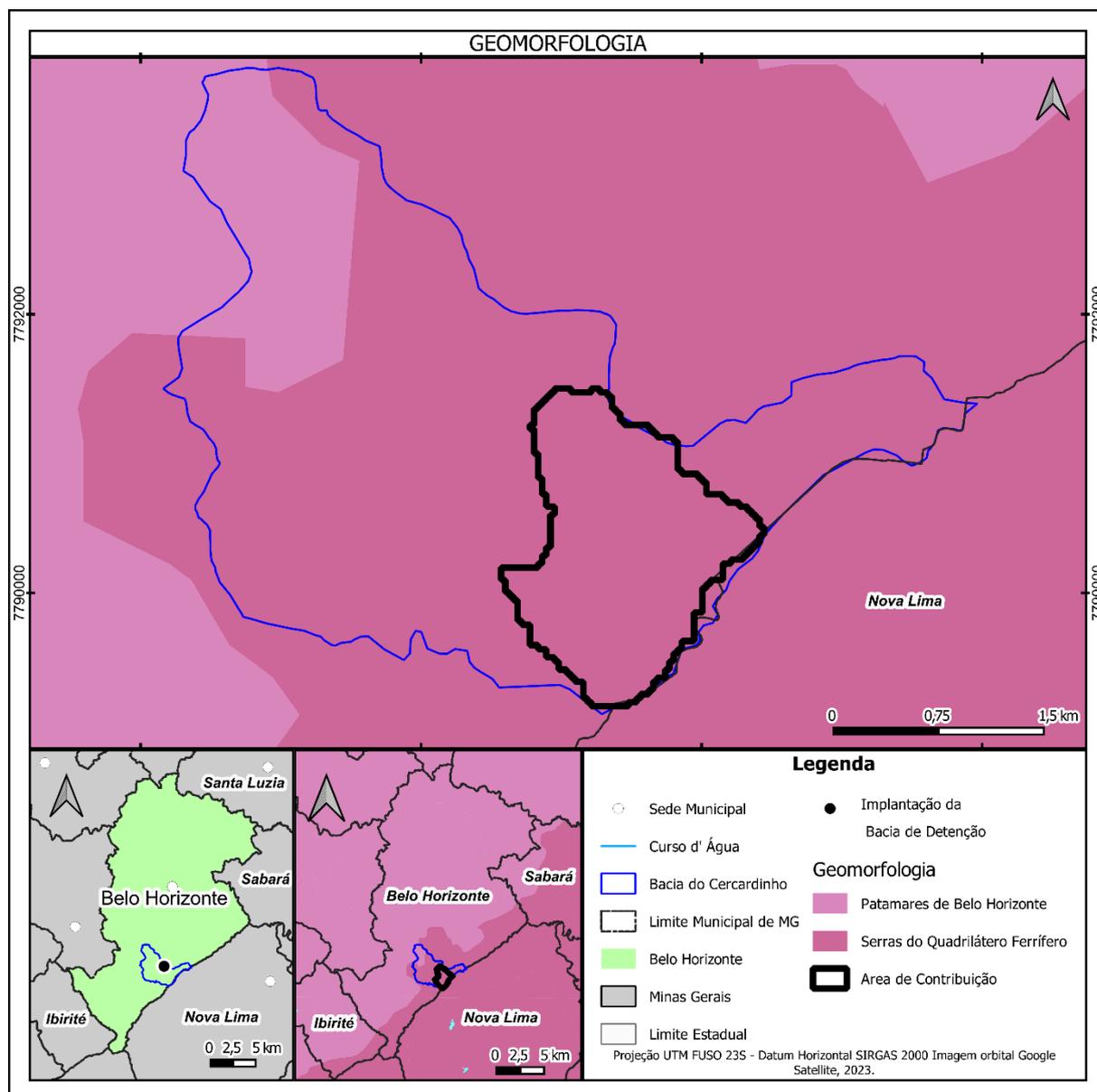
### *4.2.1. Aspectos Geomorfológicos*

A geomorfologia dedica-se a compreender as formas de relevo, suas origens e estruturas (INPE, 2022). Conforme Santos (2004), o estudo da configuração atual de uma área pode auxiliar na análise da intensidade e do tipo de processos erosivos, além de fornecer informações para a caracterização e previsão de possíveis usos do solo. Nesse contexto, a relação entre a relevância e a formação do solo torna-se evidente, já que a relevância influencia diretamente o transporte de sedimentos e de água pela superfície, além de afetar as condições de condução do local.

O relevo brasileiro é composto principalmente por planaltos, planícies e depressões (IBGE, 2022). Sabe-se que os planaltos são terrenos mais antigos relativamente planos, já as depressões são caracterizadas por estarem localizadas em áreas mais baixas do que as áreas ao redor. Por fim, as planícies são áreas planas formadas a partir da deposição de sedimentos (IBGE, 2022).

Conforme dados do IBGE, a bacia hidrográfica do Cercadinho abrange áreas de Serra e Patamares. Dentre elas, destacam-se os Patamares de Belo Horizonte, com uma extensão de 186,06 hectares, e as Serras do Quadrilátero Ferrífero, que ocupam 1.017,40 hectares, sendo está uma formação predominantemente na região, sendo essas apresentadas na Figura 4.5.

**Figura 4.5** – Geomorfologia predominante na Bacia do Cercadinho e área de estudo.



Fonte: IBGE, 2023.

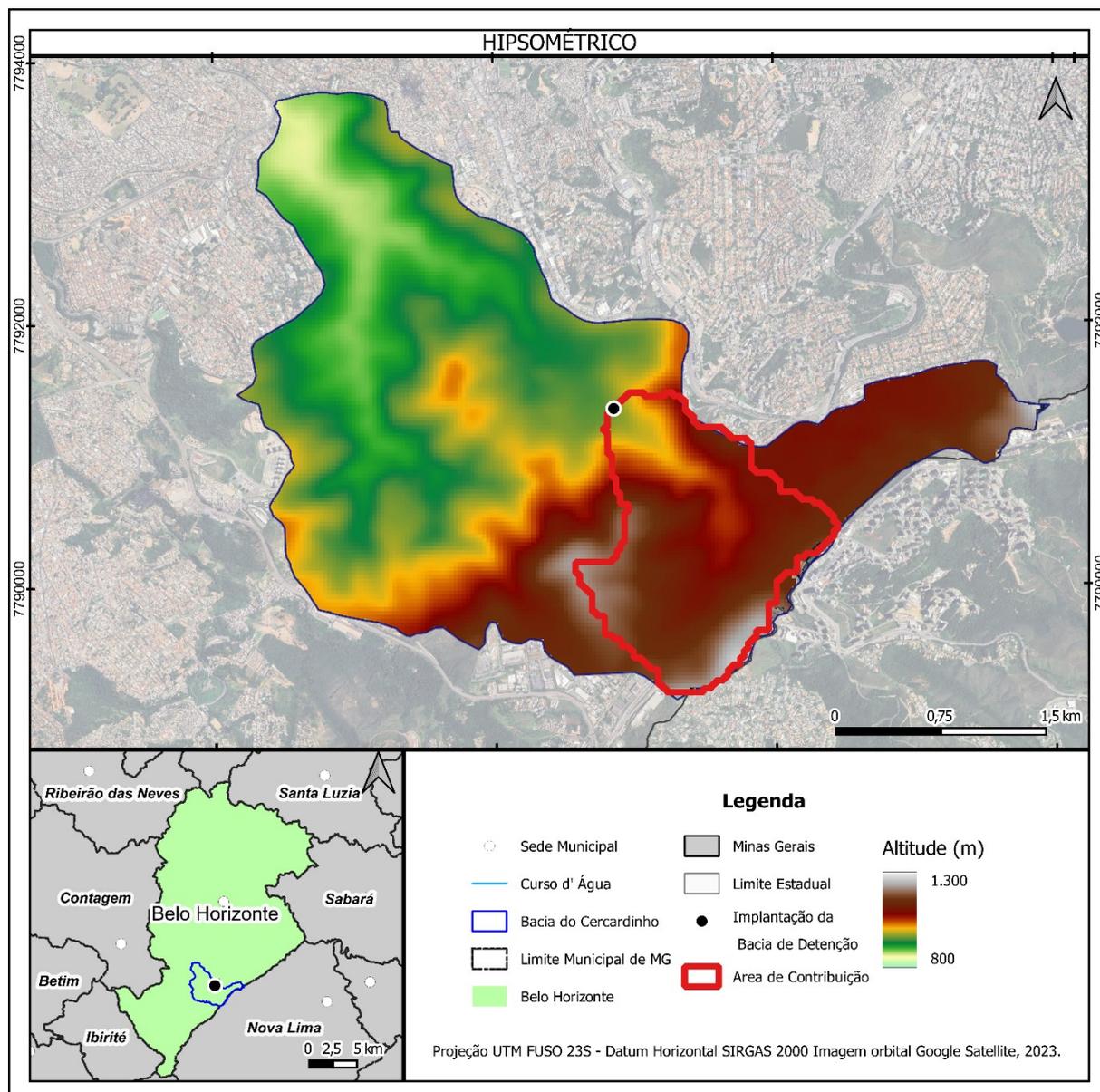
De acordo com a Figura 4.5, as Serras do Quadrilátero Ferrífero predominam, sobre a área de contribuição da bacia de detenção. De acordo com Machado (2015), o quadrilátero ferrífero tem como característica um relevo acidentado, complexidade estrutural e rochas arqueanas (granito -gnaisse) e rochas sedimentares do Supergrupo Minas (itabiritos, dolomitos, quartzitos).

#### 4.2.2. *Altimetria e declividade*

A altimetria, de acordo com Cordini (2014), consiste na ciência e na técnica de medir alturas, bem como na interpretação dos resultados obtidos ou registrados. Vale destacar que as cotas mensuradas representam valores numéricos que indicam a altitude de um ponto específico em relação a uma referência, geralmente definida com base no nível do mar.

Na Figura 4.6 é apresentado o mapa de altitudes da bacia do Cercadinho. Este mapa foi construído a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), cujos dados foram obtidos do TOPODATA. É importante ressaltar que para a delimitação da área de contribuição da bacia, o mesmo MDE foi utilizado. Conforme o mapa hipsométrico apresentado na Figura 4.7 a disposição das altitudes no território em estudo demonstra gradativas mudanças de elevação, que variam dentro da faixa de 800 a 1300 metros.

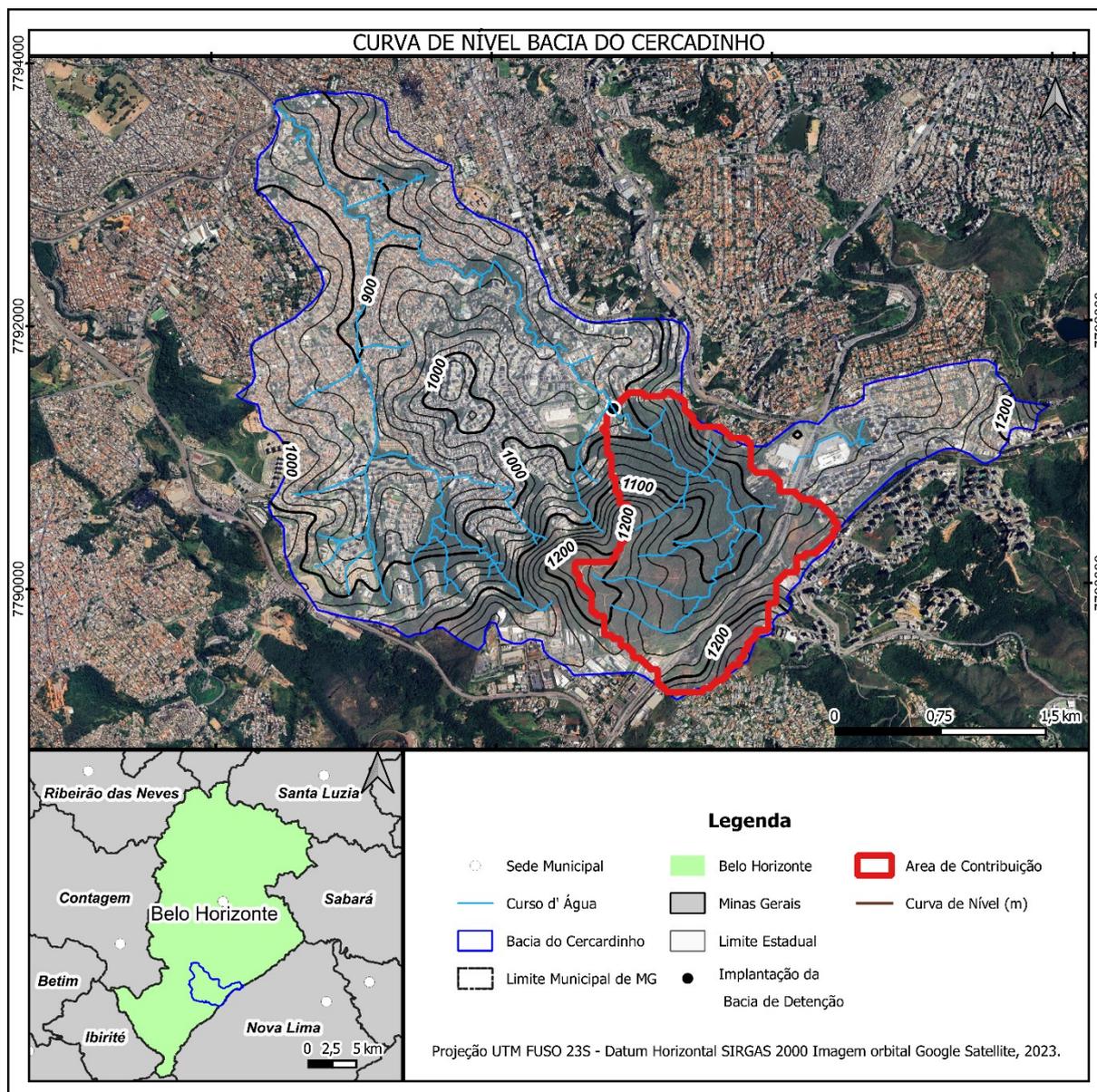
Figura 4.6 – Mapa Hipsométrico da Bacia do Cercadinho



Fonte: TopoData, 2011.

Utilizando o mesmo Modelo Digital de Elevação (MDE), que já empregado para a delimitação da área de contribuição da bacia, foi realizada a extração da curva de nível da região com uma equidistância de 10 metros, sendo apresentada na Figura 4.7.

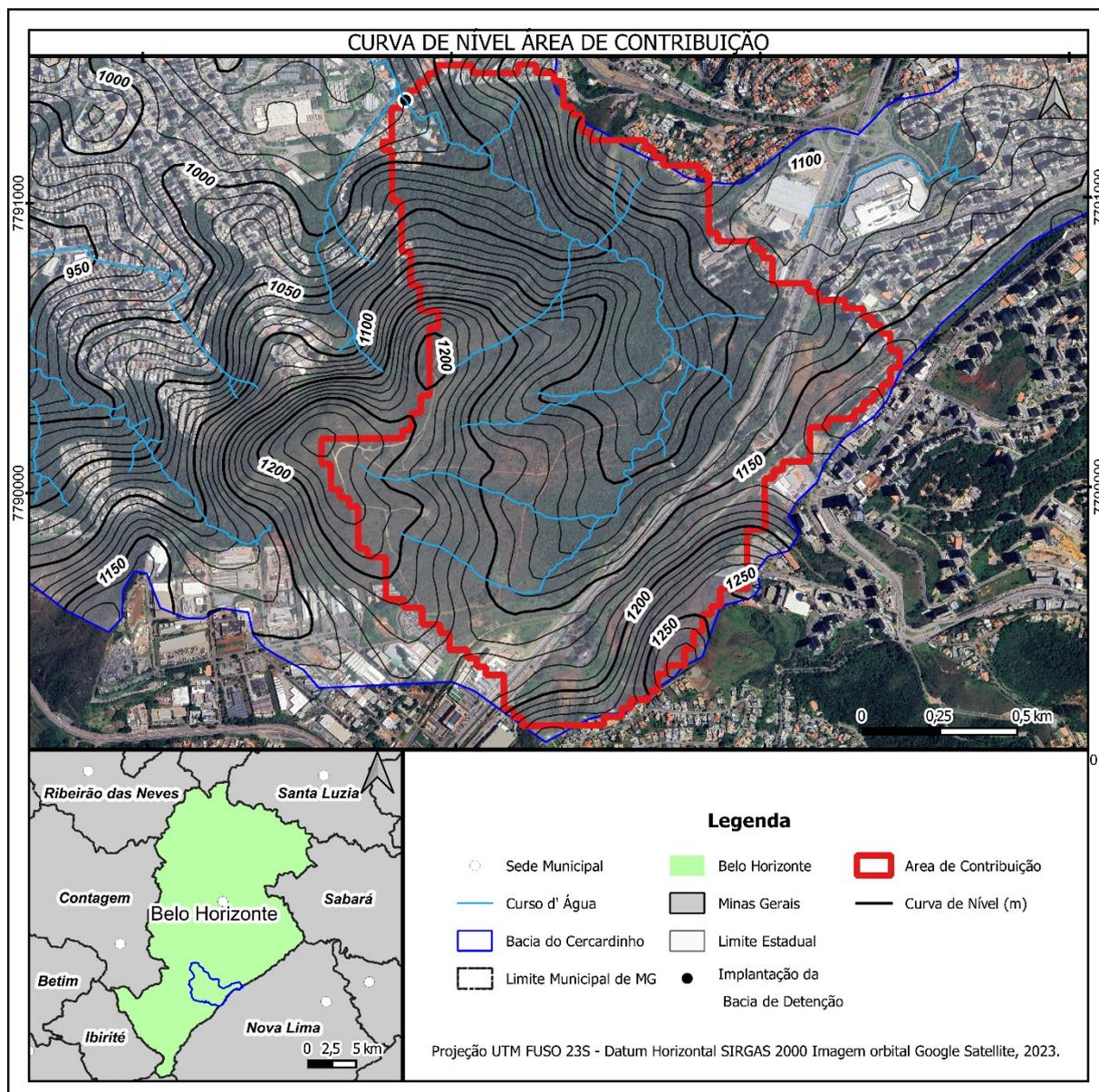
Figura 4.7 – Curva de Nível da Bacia do Cercadinho.



Fonte: Autor, 2025.

Na área de contribuição da bacia de detenção, é possível identificar pela Figura 4.8, que a cota no ponto de entrada da bacia de detenção é de 970 m e que a cota de montante é de 1200m. Além disso, o comprimento do talvegue principal nessa área de contribuição é de 3,175 km. Com a razão da diferença de cotas pelo comprimento do talvegue principal (3,175 km ou 3175m), foi possível calcular a declividade do terreno na área de contribuição da bacia de detenção, que é de 7,24%.

Figura 4.8 – Curvas de Níveis na área de estudo.



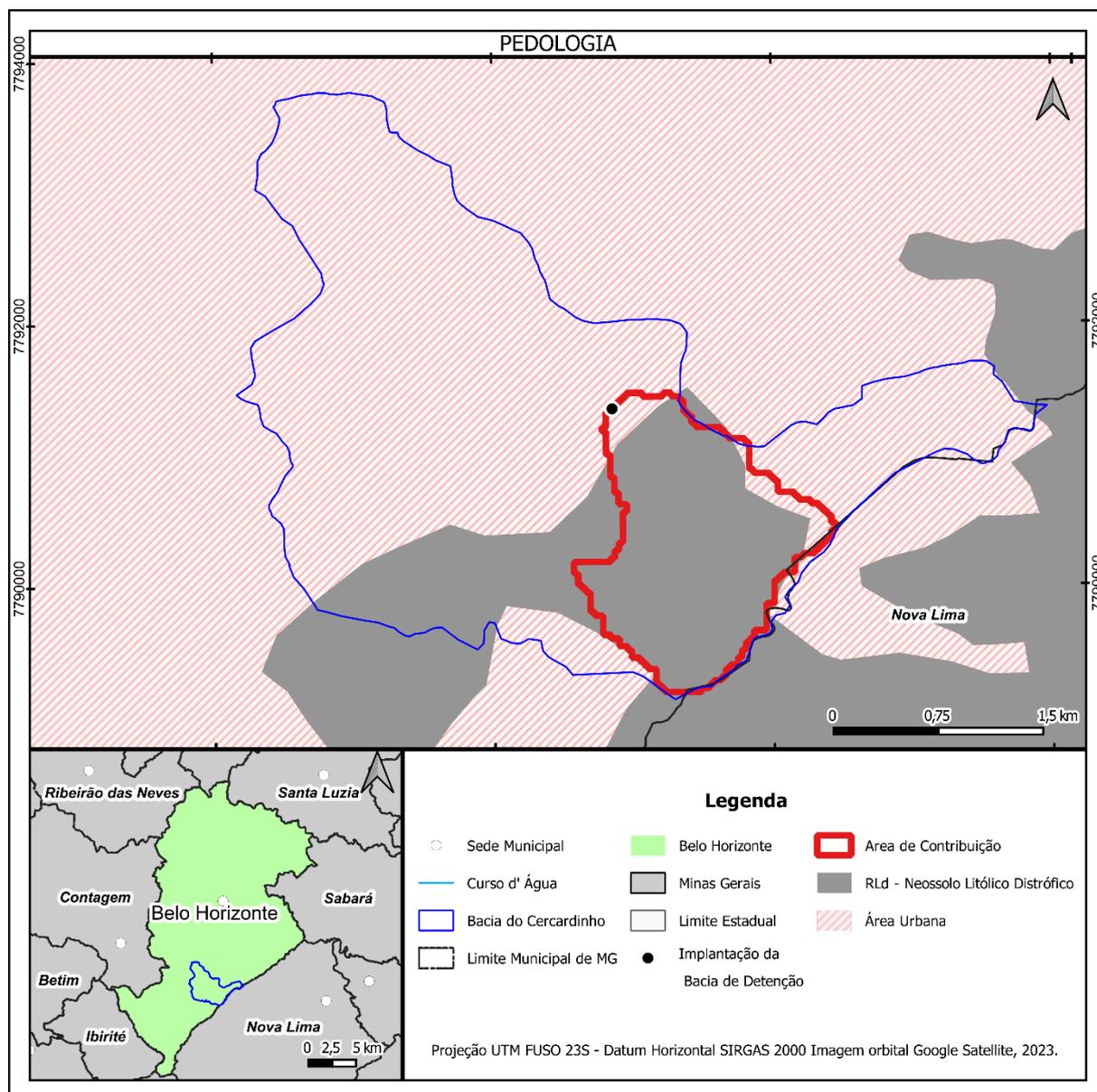
Fonte: Autor, 2025.

### 4.2.3. *Pedologia*

A pedologia é uma ciência que estuda a origem, a evolução e as características dos solos, analisando os processos que influenciam sua formação e transformação ao longo do tempo. O solo resulta da interação entre componentes minerais e orgânicos, sendo moldado por cinco fatores fundamentais: material de origem, condições climáticas, relevância, ação dos organismos vivos e tempo de exposição. Esses elementos, em conjunto, determinam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, influenciando sua classificação e uso. (EMBRAPA, 2019).

Na Figura 4.9 são apresentados os tipos de solos presente na bacia hidrográfica do Cercadinho, com suas características, obtido a partir de dados disponibilizados pela instituição pública de pesquisas, inovações e tecnologias para a agricultura e pecuária brasileira a EMBRAPA e o IBGE. O solo predominante na área de contribuição da bacia de retenção é neossolo litólico distrófico.

**Figura 4.9** – Tipos de solos predominantes na Bacia do Cercadinho e área de estudo.



Fonte: Bdia, 2023.

#### 4.2.4. Uso e Ocupação do Solo

O escoamento superficial está diretamente relacionado ao uso e ocupação do solo, uma vez que essas características influenciam a infiltração da água e a velocidade do escoamento. Áreas urbanizadas, com grande percentual de superfícies impermeáveis, tendem a reduzir a infiltração e aumentar o escoamento superficial, enquanto regiões com cobertura vegetal densa favorecem a absorção da água pelo solo. Além disso, o tipo de uso do solo afeta a capacidade de retenção de água, alterando a distribuição do escoamento e o armazenamento hídrico no subsolo (VANZELA; HERNANDEZ; FRANCO, 2010).

Para a análise da bacia do cercadinho, utilizaram-se os dados disponibilizados pelo MapBiomas, rede colaborativa formada por diversas ONGs, universidades e *startups* de tecnologia e que produz um mapeamento anual da cobertura e uso da terra desde 1985 (MAPBIOMAS, 2022). Fez-se uso, em especial, da Coleção 9, que inclui os dados anuais de cobertura e uso de terra do Brasil para o período de 1985 a 2023.

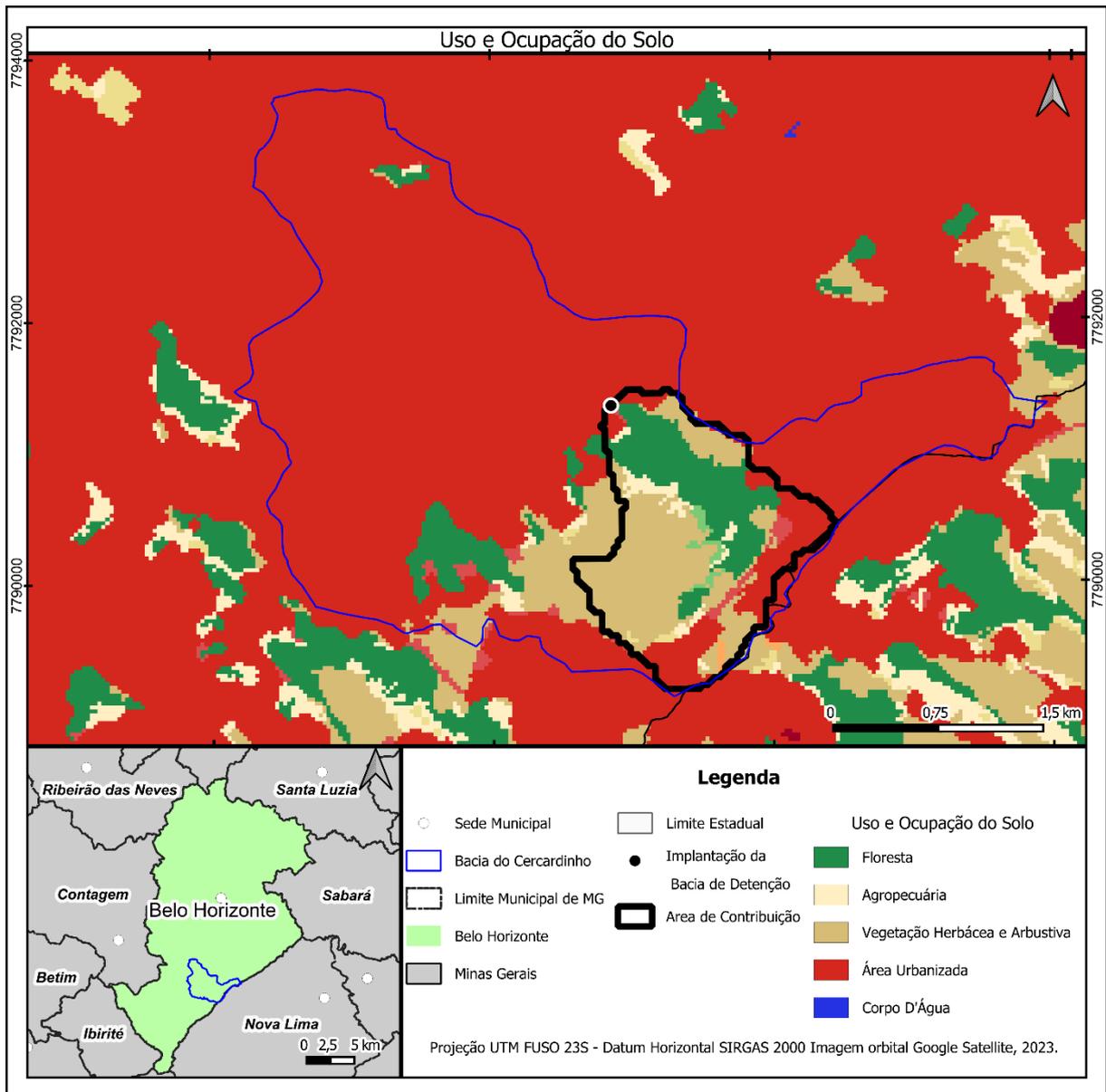
Na Tabela 4.2 e Figura 4.10, são mostradas as classes de uso e cobertura do solo da bacia do Cercadinho. Observa-se que a cobertura territorial da área de estudo concentra-se majoritariamente em áreas urbanizadas (75,2%).

**Tabela 4.2** – Uso e cobertura do solo na bacia do Cercadinho.

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Formação Florestal	0,990	8,2%
Formação Savânica	0,043	0,4%
Formação Campestre	1,648	13,6%
Afloramento Rochoso	0,013	0,1%
Pastagem	0,023	0,2%
Mosaico de Usos	0,162	1,3%
Área Urbanizada	9,118	75,2%
Outras Áreas não vegetadas	0,123	1,0%
Corpo D'Água	0	0,0%
Total	12,119	100,0%

Fonte: MapBiomas, 2023.

**Figura 4.10 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Cercadinho.**



Fonte: MapBiomias, 2023.

#### 4.2.5. *Clima*

O clima corresponde à média das condições atmosféricas registradas ao longo de décadas (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Durante esse período, diversos sistemas meteorológicos influenciaram as variações do tempo, impactando diretamente as atividades humanas. Nesse contexto, o estudo climático é essencial para analisar padrões pluviométricos e compreender sua relevância no planejamento e dimensionamento de infraestruturas hídricas e de saneamento básico. A avaliação destas características permite a adequação de equipamentos e sistemas para garantir maior eficiência na gestão dos recursos hídricos.

Segundo o mapa de classificação climática elaborado por Alvares *et al.* (2013) e com base na classificação de Köppen e Geiger, o clima que prevalece na região é o tipo moderado quente (Cwa).

#### 4.2.6. *Pluviometria*

A pluviometria, segundo Tucci (2001), refere-se ao estudo e à medição da quantidade de ocorrência pluvial em uma determinada área, geralmente expressa em milímetros (mm). Este campo da hidrologia é fundamental para entender os padrões de chuva em uma região, permitindo a análise do comportamento das águas superficiais, o planejamento do uso do solo, e o desenvolvimento de estratégias para a gestão de recursos hídricos, controle de inundações e prevenção de secas. A pluviometria também é essencial para a avaliação dos impactos ambientais causados por eventos de precipitação e para o dimensionamento de infraestruturas urbanas relacionadas à drenagem e ao controle hídrico.

A área de estudo conta com duas estações pluviométricas. A primeira, identificada pelo código F501, é operada pelo INMET e está localizada nas coordenadas latitude -19,98 e longitude -43,96. A segunda estação, com código PLV02-MUT, é operada pela VALE e está situada no município de Nova Lima, especificamente na Mina de Mutuca (PINHEIRO, 2011).

A seleção da estação pluviométrica mais adequada para o estudo da sub-bacia considerou a disponibilidade e confiabilidade dos dados como critério primordial. A estação PLV02-MUT, localizada na Mina de Mutuca, situa-se a aproximadamente 4 km do centro de gravidade da bacia de contribuição. Contudo, o fator decisivo para sua escolha é que, conforme os dados apresentados por Pinheiro (2011, Tabela AI7.15, p. 279), esta estação já

fornece a altura pluviométrica necessária e referenciada para as análises, sendo apresentada na Tabela 4.3

Por outro lado, a estação F501, operada pelo INMET, está mais próxima do centro de gravidade da bacia de contribuição, a apenas aproximadamente 2 km. Apesar dessa proximidade, os dados da estação PLV02-MUT (Mina de Mutuca) serão priorizados para as análises hidrológicas na sub-bacia devido à sua comprovada disponibilidade de dados de altura pluviométrica já estabelecidos e referenciados por Pinheiro (2011).

**Tabela 4.3 – Altura Pluviométrica (mm) na Mina Mutuca.**

Duração (d)	Tempo de Retorno T (anos)										
	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1000	10000
6 min	12,1	15,4	17,5	19,6	20,3	22,3	21,7	23,5	25,9	27,6	33,6
10 min	19,6	24,7	28,1	31,3	32,3	35,3	36,3	39,1	42,7	45,4	54,3
15 min	25,5	32,2	36,5	40,5	41,8	45,7	47,9	51,5	56,1	59,6	70,7
20 min	29,8	37,5	42,4	47,1	48,6	53	56,1	60,3	65,7	69,6	82,4
30 min	35,7	44,9	50,8	56,3	58,1	63,3	67,7	72,7	79,1	83,7	98,8
1 hora	45,9	57,6	65,1	72,1	74,4	81	87,5	93,8	102	108	127
2 horas	59,4	75	85	94,6	97,6	107	116	125	136	145	173
3 horas	67,3	85,1	96,7	108	111	122	132	143	156	166	199
4 horas	73	92,3	105	117	121	133	144	155	170	181	218
6 horas	80,9	102	117	130	134	148	161	173	190	203	245
8 horas	86,5	110	125	139	144	158	172	186	204	218	264
10 horas	90,9	115	131	147	152	167	181	196	215	230	278
12 horas	94,4	120	137	153	158	173	189	204	224	240	290
18 horas	102	130	148	166	171	188	205	222	244	261	317
24 horas	108	137	157	175	181	199	217	235	259	276	336
2 dias	138	177	202	227	235	259	282	306	337	361	439
3 dias	169	216	247	277	286	315	344	373	411	439	535
5 dias	218	277	317	354	366	403	440	476	524	561	682
7 dias	257	327	373	417	431	475	518	560	617	659	801
10 dias	307	389	443	495	511	562	612	662	728	778	944
15 dias	375	477	544	609	629	692	755	817	899	961	1.167,00
20 dias	433	548	624	697	720	792	862	933	1.026,00	1.096,00	1.330,00
30 dias	531	666	756	841	869	953	1.036,00	1.119,00	1.228,00	1.311,00	1.586,00

Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2011.

### 4.3. Coleta e Tratamento dos Dados Hidrológicos

Após a caracterização da bacia do cercadinho e a delimitação do local de implantação da bacia de detenção, foram realizadas as coletas, tratamentos e análises dos dados iniciais para a etapa de modelagem hidrológica. O objetivo dessa modelagem é simular o comportamento hidrológico da área de estudo, com e sem a implantação da bacia de detenção.

Para dar início à modelagem hidrológica da área de estudo, foram levantados os parâmetros da área de contribuição da bacia de detenção. Estes dados, fundamentais para as etapas subsequentes do estudo, foram obtidos em fases anteriores da metodologia, conforme detalhado na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Parâmetros da área de contribuição.**

Parâmetros	Valor	Unidade
Área de Contribuição	2,39	km <sup>2</sup>
Comprimento do Talvegue Principal	3,175	km
Cota de Montante do Talvegue Principal	1200	m
Cota de Jusante do Talvegue Principal	970	m
Declividade	7,56	%

Fonte: Autor, 2025.

Para a determinação do tempo de concentração ( $T_c$ ) da bacia de contribuição, essencial para as análises hidrológicas, optou-se pela aplicação da equação de Kirpich. Conforme apresentado no referencial teórico, diversas fórmulas empíricas podem ser utilizadas para este cálculo. No entanto, a escolha da equação de Kirpich se justifica pela sua adequação ao contexto da área de estudo, sendo dada pela seguinte expressão:

$$t_c = 23,38 \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,77} \quad (4-1)$$

na qual:

$t_c$  = Tempo de Concentração, em (min);

L = Comprimento total do talvegue principal, em (km);

I = Declividade Média, em (%).

Aplicando a equação de Kirpich aos parâmetros da bacia de contribuição, obteve-se um tempo de concentração calculado de 26,55 minutos. Para fins de projeto e conservação, adotou-se um valor de 30 minutos para todas as simulações. Além disso, foi definido o tempo de retardo (lag time) como 60% do tempo de concentração (18 minutos).

O Número Curva (CN), parâmetro amplamente detalhado no capítulo 3, foi empregado para estimar o volume de escoamento superficial direto a partir da precipitação. Sua determinação foi realizada utilizando dados de uso e cobertura do solo e dos grupos hidrológicos, obtidos no catálogo de metadados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA,2022) e tratados no ambiente do QGIS, conforme apresentado na Tabela 4.5, para a área em estudo, o valor de CN estimado foi de 79,13.

**Tabela 4.5** – Valores de CN obtidos para a área de contribuição.

CN	Área (km <sup>2</sup> )
69	0,564
79	1,147
84	0,174
88	0,007
89	0,503
Média Ponderada	79,136

Fonte: ANA, 2022.

#### 4.4 Modelagem hidrológica

A chuva de projeto, fundamental para as análises hidrológicas deste estudo, foi obtida a partir do trabalho desenvolvido por Pinheiro (2011). Este estudo forneceu dados de precipitação para diferentes períodos de retorno, específicos para a estação pluviométrica da Mina de Mutuca (apresentados originalmente na Tabela 4.3). Para o presente estudo, a precipitação de projeto adotada foi para o intervalo de 30 minutos, sendo de 67,70 mm, correspondente ao período de retorno de 100 anos, cujos valores para as diferentes durações são detalhados na Tabela 4.6

**Tabela 4.6** – Altura Pluviométrica (mm) para um tempo de retorno de 100 anos na Mina Mutuca.

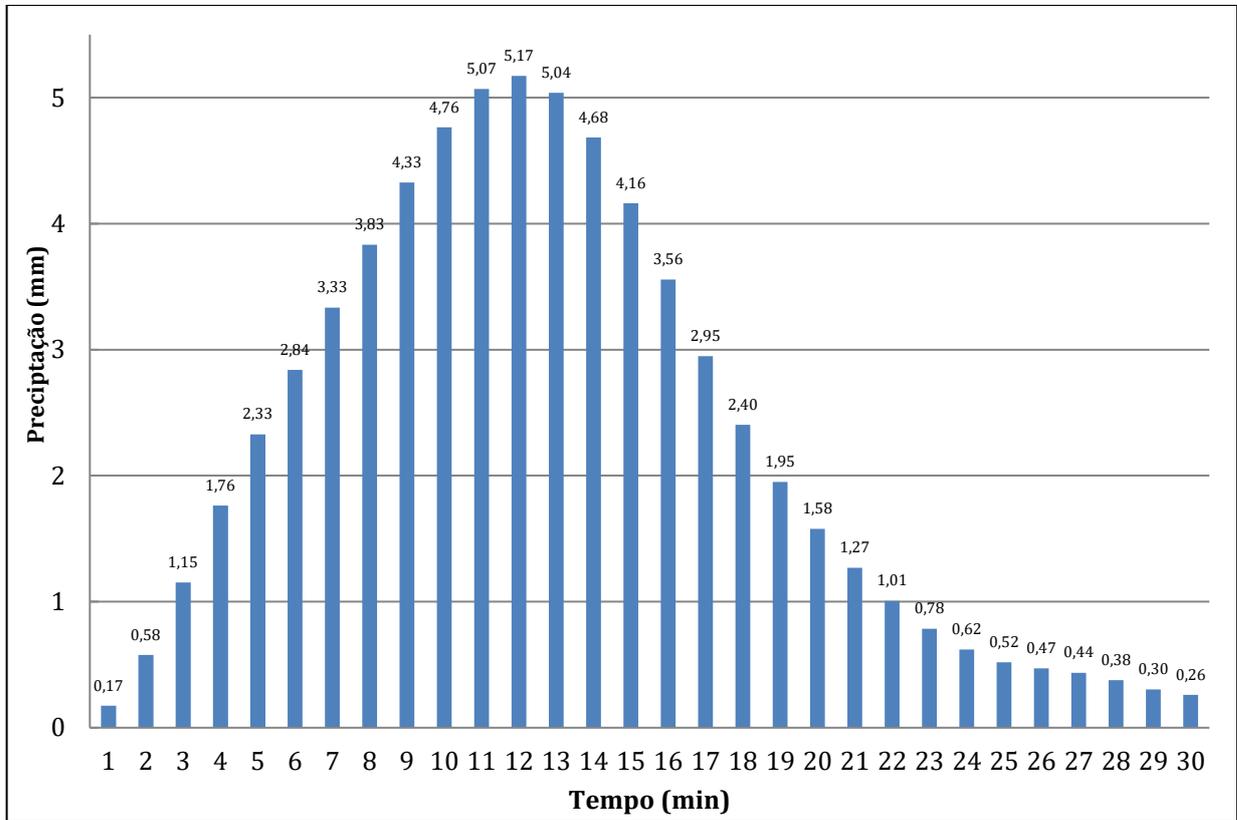
Duração (d)	Tempo de Retorno T (100 anos)
	Chuva (mm)
6 min	21,70
10 min	36,30
15 min	47,90
20 min	56,10
30 min	67,70
1 hora	87,50
2 horas	116,00
3 horas	132,00
4 horas	144,00
6 horas	161,00
8 horas	172,00
10 horas	181,00
12 horas	189,00
18 horas	205,00
24 horas	217,00
2 dias	282,00
3 dias	344,00
5 dias	440,00
7 dias	518,00
10 dias	612,00
15 dias	755,00
20 dias	862,00
30 dias	1.036,00

Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2011.

A distribuição temporal da chuva de projeto foi gerada utilizando-se o método de Huff, sendo apresentada na Figura 4.11. Esses dados de distribuição de precipitação serão posteriormente

utilizados como entrada no modelo hidrológico HEC-HMS, empregando-se a menor discretização temporal de chuva possível no software, de 1 minuto.

**Figura 4.11** – Gráfico da distribuição da chuva.



Fonte: Autor, 2025.

Devido à ausência de informações pré-existentes sobre uma bacia de retenção para a área de estudo, optou-se por realizar uma simulação hidrológica para a implantação de bacias com diferentes valores de área superficial. A altura da bacia foi predefinida em 3 metros, determinada a partir das curvas de nível na área do projeto, abrangendo as elevações de 957 metros a 960 metros.

Especificamente, o fundo do reservatório foi estabelecido na cota 957 metros, e a cota do topo (ou da rua adjacente) foi definida em 960 metros, resultando na altura de 3 metros da bacia de retenção. Para fins de simplificação e modelagem, considerou-se uma bacia no formato de um paralelepípedo. O dispositivo de controle de vazão desta bacia foi modelado como um vertedor de soleira delgada, com as seguintes dimensões e características: um coeficiente de descarga (C) de 1,7, uma largura de 1,5 metros e uma altura de 3,0 metros.

Ressalta-se que, no modelo HEC-HMS, a unidade do parâmetro volume é (x 1.000 m<sup>3</sup>). Para a avaliação da capacidade das bacias de detenção, a curva Cota, Área e Volume foi determinada para diferentes dimensões propostas. Foram definidas áreas para a implantação da bacia de detenção nos valores de 15.000, 20.000, 30.000 e 50.000. A seguir, é apresentada a Tabela 4.8, que detalha a relação Cota x Volume para cada área superficial considerada.

**Tabela 4.7** – Relação Cota x Volume em (x1.000 m<sup>3</sup>).

Cota (m)	Área			
	15000	20000	30000	50000
957,00	0,00	0,00	0,00	0,00
957,50	7,50	10,00	15,00	25,00
958,00	15,00	20,00	30,00	50,00
958,50	22,50	30,00	45,00	75,00
959,00	30,00	40,00	60,00	100,00
959,50	37,50	50,00	75,00	125,00
960,00	45,00	60,00	90,00	150,00

Fonte: Autor, 2025.

Em função da área de cada bacia de detenção simulada, foram obtidos os respectivos hidrogramas de saída, que permitiram determinar a vazão de pico (vazão efluente) e o volume efluente. Esses resultados, que quantificam o amortecimento proporcionado pela implantação das bacias de detenção, estão apresentados e discutidos na seção de Resultados e Discussão.

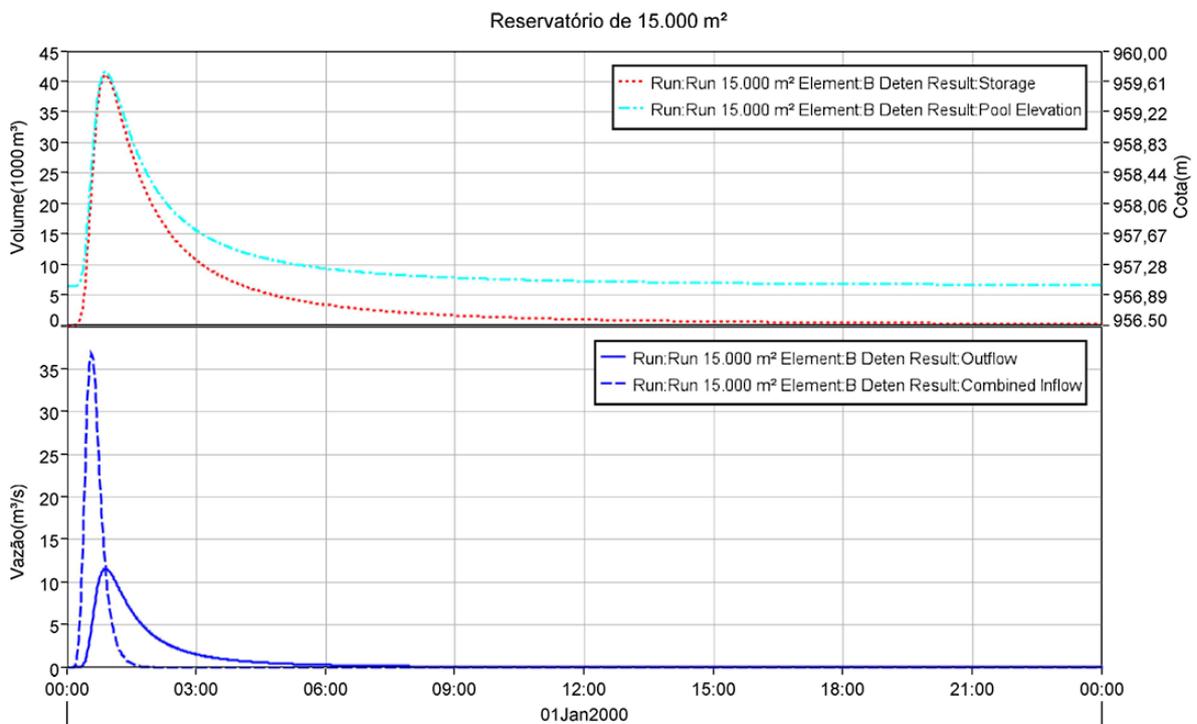
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita anteriormente. Serão detalhados os principais produtos da modelagem hidrológica, incluindo os hidrogramas de saída, as vazões de pico e os volumes efluentes para as bacias de detenção simuladas com áreas superficiais de 15.000 m<sup>2</sup>, 20.000 m<sup>2</sup>, 30.000 m<sup>2</sup> e 50.000 m<sup>2</sup>.

A simulação hidrológica revelou que uma bacia de detenção com área de 10.000 m<sup>2</sup> não seria adequada para o controle das vazões na bacia do Córrego Cercadinho, uma vez que o reservatório transbordaria devido à insuficiência de suas dimensões para suportar a carga de vazão prevista.

Na Figura 5.1 é apresentado o comportamento hidrológico simulado para um reservatório de detenção com área de 15.000 m<sup>2</sup>, em resposta a um evento de precipitação, com duração da chuva de 30 minutos e período de retorno de 100 anos. Ele é composto por dois gráficos que ilustram a dinâmica do volume e vazão do escoamento, bem como os valores de entrada e saída do reservatório.

**Figura 5.1** – Gráfico do Reservatório de 15.000 m<sup>2</sup>.



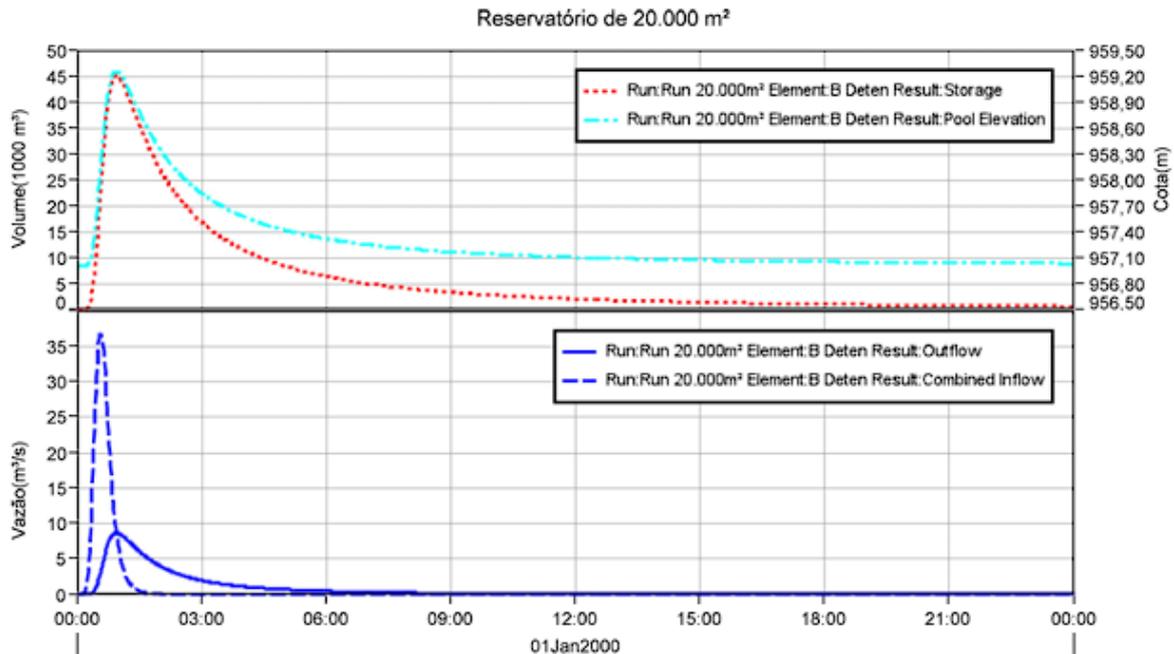
Fonte: Autor, 2025.

A análise do comportamento hidrológico simulado para o reservatório de detenção com área de 15.000 m<sup>2</sup>, revela importantes dinâmicas tanto de armazenamento quanto de vazão. Observando o gráfico superior da Figura 5.1, que correlaciona volume (em x 1.000 m<sup>3</sup>) e a elevação do reservatório (m) em função do tempo, a curva de volume (*Storag* - linha vermelha pontilhada) demonstra um rápido aumento no início do evento de chuva. O volume de água armazenado no reservatório atinge um pico de aproximadamente 41,09 x 1.000m<sup>3</sup>. Após esse ponto máximo, o volume começa a diminuir progressivamente, indicando a função de armazenamento temporário e liberação controlada da água pelo vertedor de saída. A curva de cota (*Pool Elevation* - linha azul clara pontilhada) espelha o comportamento do volume, acompanhando o nível de elevação da água dentro do reservatório. A cota máxima atingida foi de aproximadamente 959,74 m, um valor que se encontra muito próximo dos 960 m, cota do topo da bacia definida no projeto. Este resultado sugere que a bacia possui capacidade adequada para conter o volume gerado pelo evento pluviométrico, sem que ocorram extravasamentos indesejados.

No gráfico inferior, da Figura 5.1 que detalha a variação da vazão ao longo do tempo, possibilitando visualizar o impacto direto da bacia no regime hidrológico. O hidrograma de entrada (*Combined Inflow* - linha azul escura tracejada) apresenta um pico de vazão significativo de aproximadamente 36,77 m<sup>3</sup>/s, caracterizado por uma ascensão e recessão relativamente rápidas. Este hidrograma representa a carga original que a bacia de detenção foi projetada para amortecer. Em contraste, o hidrograma de saída (*Outflow* - linha azul sólida), que representa a vazão controlada liberada pelo reservatório, evidencia que o amortecimento do pico (atenuação) é substancial; a vazão de pico de saída é drasticamente reduzida para 11,56 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a uma redução de cerca de 68% em relação à vazão máxima de entrada, esta atenuação é o principal objetivo da bacia de detenção, amortecendo os picos de cheia.

Continuando a análise do desempenho das bacias de detenção, na Figura 5.2 é mostrado o comportamento hidrológico simulado para o reservatório de 20.000 m<sup>2</sup>.

**Figura 5.2** – Gráfico do Reservatório de 20.000 m<sup>2</sup>.



Fonte: Autor, 2025.

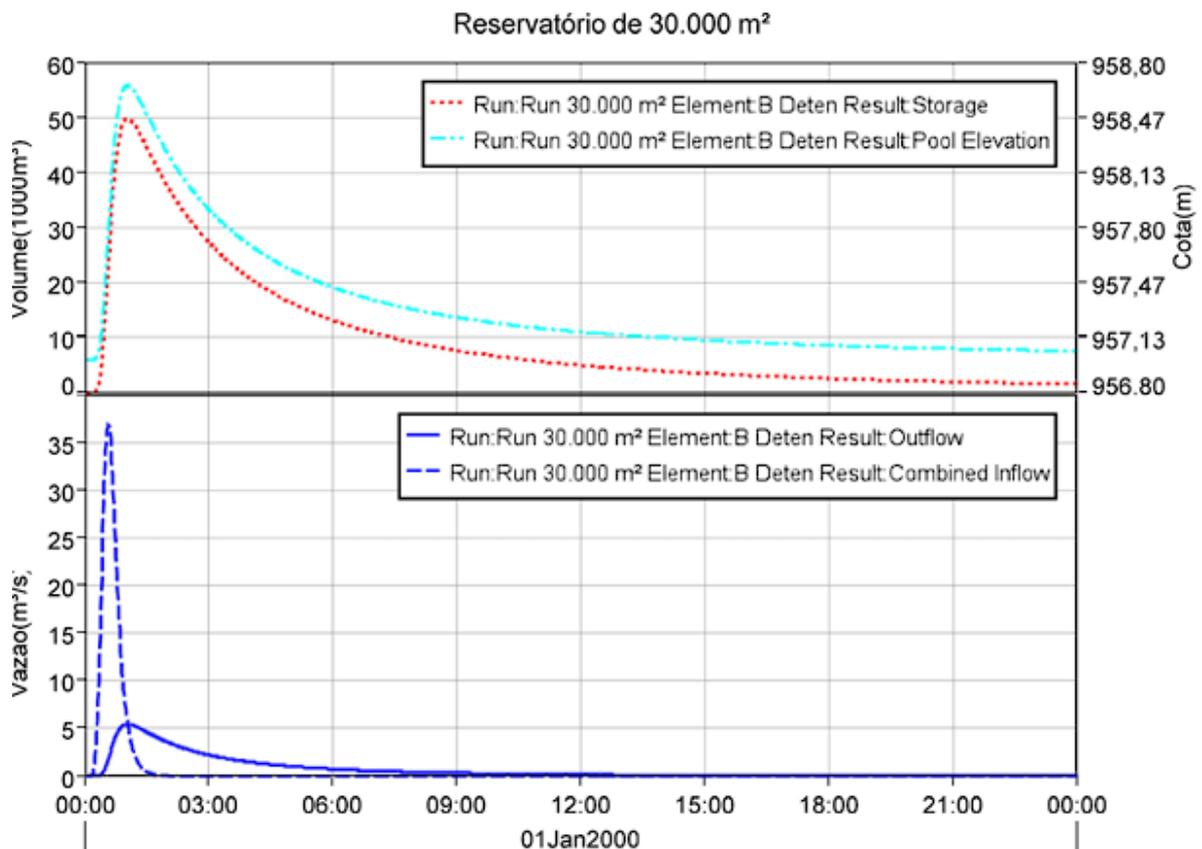
Observando o gráfico superior da Figura 5.2, que correlaciona volume (em x 1.000m<sup>3</sup>) e a elevação do reservatório (m) em função do tempo, a curva de volume (*Storage* - linha vermelha pontilhada) demonstra um rápido aumento no início do evento de chuva. O volume de água armazenado no reservatório atinge um pico de aproximadamente 45,06 x 1.000m<sup>3</sup> (ou 45,06 m<sup>3</sup>). Após esse ponto máximo, o volume começa a diminuir progressivamente, indicando a função de armazenamento temporário e liberação controlada da água pelo vertedor de saída. A curva de cota (*Pool Elevation* - linha azul clara pontilhada) espelha o comportamento do volume, acompanhando o nível de elevação da água dentro do reservatório. A cota máxima atingida foi de aproximadamente 959,25 m, um valor que se encontra notavelmente mais baixo que a cota máxima observada na bacia de 15.000 m<sup>2</sup> (959,74 m) e bem abaixo dos 960 m, cota do topo da bacia definida no projeto. Este resultado sugere que a bacia de 20.000 m<sup>2</sup> possui uma maior capacidade de armazenamento para conter o volume gerado pelo evento pluviométrico, com maior margem de segurança contra extravasamentos indesejados.

No gráfico inferior da Figura 5.2, o hidrograma de entrada (*Combined Inflow* - linha azul escura tracejada) apresenta um pico de vazão significativo de aproximadamente 36,765 m<sup>3</sup>/s,

caracterizado por uma ascensão e recessão relativamente rápidas. Este hidrograma representa a carga original que a bacia de detenção foi projetada para amortecer. Em contraste, o hidrograma de saída (*Outflow* - linha azul sólida), que representa a vazão controlada liberada pelo reservatório, evidencia que o amortecimento do pico (atenuação) é substancial; a vazão de pico de saída é drasticamente reduzida para cerca de 8,621 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a uma redução de aproximadamente 77% em relação à vazão máxima de entrada. Esta atenuação demonstra a maior eficácia da bacia de 20.000 m<sup>2</sup> em mitigar os picos de cheia, comparado ao cenário de 15.000 m<sup>2</sup>. Adicionalmente, o atraso do pico da vazão de saída em relação ao pico da vazão de entrada é mais pronunciado, e o alargamento da base do hidrograma de saída é visível, indicando que a vazão é distribuída por um período de tempo mais extenso.

Dando prosseguimento à avaliação da eficácia das diferentes áreas de bacias de detenção, na Figura 5.3, os resultados da simulação para o reservatório de 30.000 m<sup>2</sup> são apresentados.

**Figura 5.3** – Gráfico do Reservatório de 30.000 m<sup>2</sup>.



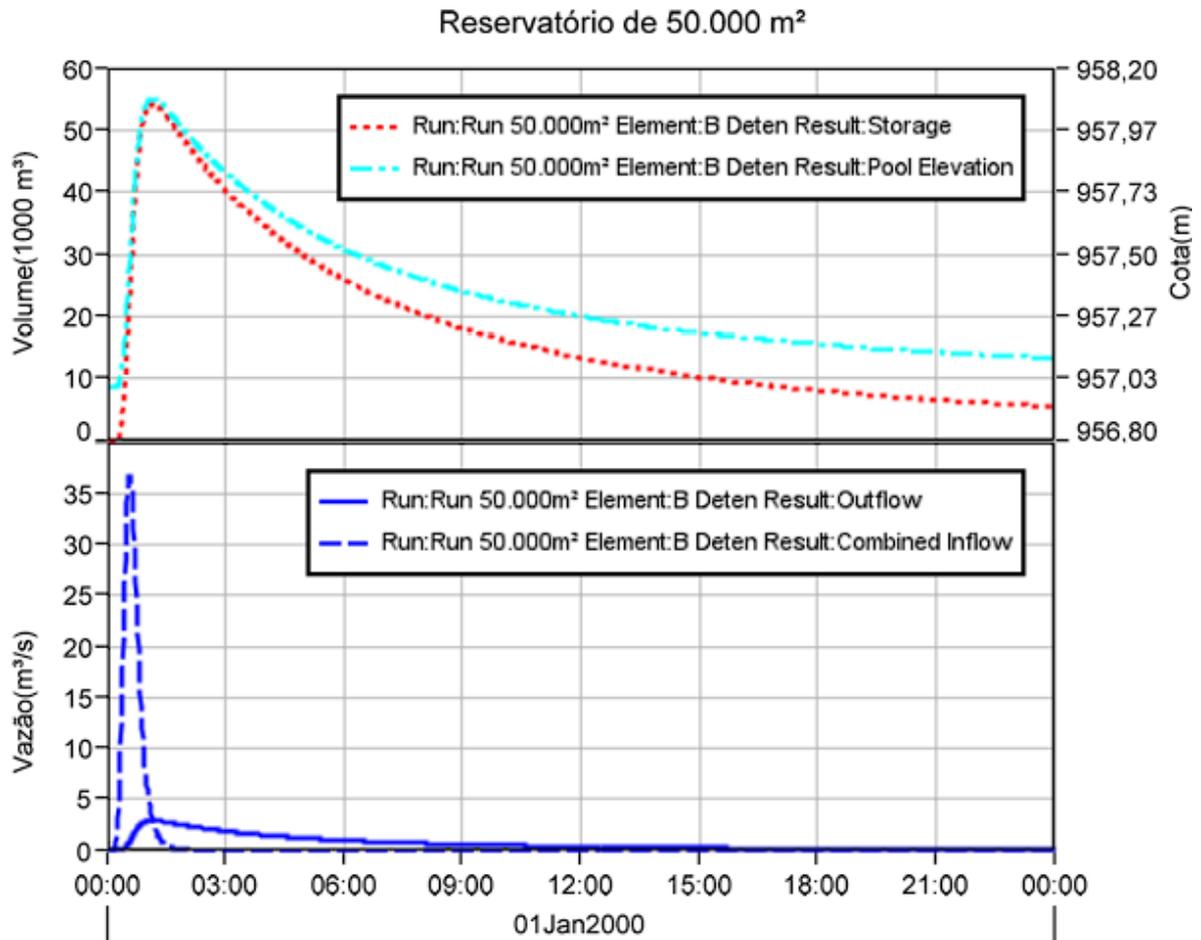
Fonte: Autor, 2025.

No gráfico superior da Figura 5.3, a curva de volume (*Storage* - linha vermelha pontilhada) reflete uma rápida acumulação inicial, atingindo um pico de armazenamento de aproximadamente  $49,76 \times 1.000\text{m}^3$  (ou  $49.760 \text{ m}^3$ ). Após esse ponto, o volume decresce à medida que a água é gradualmente liberada, confirmando a função de retardo do fluxo. A curva de cota (*Pool Elevation* - linha azul clara pontilhada), que espelha o comportamento do volume, demonstra que a cota máxima atingida no reservatório foi de aproximadamente 958,66 m. Este nível representa uma redução considerável em comparação com as cotas máximas observadas nas bacias de  $15.000 \text{ m}^2$  e  $20.000 \text{ m}^2$  (959,74 m e 958,8 m, respectivamente), permanecendo significativamente abaixo da cota de topo de 960 m. Tal observação sublinha a capacidade expandida da bacia de  $30.000 \text{ m}^2$  em lidar com o volume pluviométrico, assegurando uma margem de segurança ainda maior contra qualquer extravasamento.

O hidrograma de entrada (*Combined Inflow* - linha azul escura tracejada, no gráfico inferior da Figura 5.3) mantém seu pico de vazão em torno de  $36,76 \text{ m}^3/\text{s}$ , característica do evento de projeto. No entanto, o hidrograma de saída (*Outflow* - linha azul sólida), que representa a vazão controlada efluente, manifesta um amortecimento do pico ainda mais expressivo. A vazão de pico de saída é drasticamente reduzida para cerca de  $5,45 \text{ m}^3/\text{s}$ , representando uma diminuição de aproximadamente 85% em relação à vazão máxima de entrada, evidenciando uma eficácia superior na mitigação dos picos de cheia.

Finalizando a análise das simulações para este estudo, na Figura 5.4 é apresentado o comportamento hidrológico simulado para o reservatório de  $50.000 \text{ m}^2$ , que corresponde à maior área proposta para a bacia de detenção dentro desta pesquisa. Embora, em outros contextos de projeto, áreas superiores a  $50.000 \text{ m}^2$  possam ser consideradas, para as necessidades e objetivos do presente estudo, não se verificou a necessidade de simular dimensões maiores.

Figura 5.4 – Gráfico do Reservatório de 50.000 m<sup>2</sup>.



Fonte: Autor, 2025.

A curva de Volume (*Storage* - linha vermelha pontilhada, no gráfico superior da Figura 5.4) apresenta uma acumulação rápida, atingindo um pico de armazenamento de aproximadamente  $54,17 \times 1.000\text{m}^3$  (ou  $54.17 \text{m}^3$ ). Este é o maior volume armazenado entre todos os cenários. A subsequente diminuição do volume reflete a liberação controlada da água. A curva de cota (linha azul clara pontilhada), que acompanha a elevação da água, demonstra que a cota máxima atingida no reservatório foi de aproximadamente 957,9 m. Este nível é o mais baixo entre todas as áreas simuladas e consideravelmente inferior aos 960 m da cota de topo da bacia. Tal resultado evidencia a excepcional capacidade de armazenamento da bacia de detenção de 50.000 m<sup>2</sup>, que consegue conter o volume pluviométrico com uma utilização mínima de sua altura, garantindo a maior margem de segurança contra extravasamentos.

Contudo, é fundamental reconhecer que a dimensão superior da estrutura proposta implica na ocupação de uma área considerável, o que pode representar um desafio significativo em termos de disponibilidade de espaço e custo de implantação, sobretudo em contextos urbanos consolidados ou com restrições físicas do terreno. No caso específico da bacia de detenção estudada, observa-se que a área proposta para sua implantação se encontra inserida em uma Área de Preservação Permanente (APP), conforme estabelecido pela legislação ambiental vigente. Diante disso, torna-se imprescindível que a intervenção busque uma supressão mínima da vegetação nativa, respeitando os princípios do desenvolvimento sustentável e os critérios legais de intervenção em APPs, conforme previsto no Código Florestal (Brasil, 2012).

O hidrograma de entrada (*Combined Inflow* - linha azul escura tracejada, no gráfico inferior da Figura 5.4) mantém seu pico de vazão em torno de 36,76 m<sup>3</sup>/s. No entanto, o hidrograma de saída (*Outflow* - linha azul sólida), que representa a vazão controlada efluente, revela um amortecimento do pico extremamente significativo. A vazão de pico de saída é reduzida para cerca de 2,88 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a uma diminuição impressionante de aproximadamente 92% em relação à vazão máxima de entrada. Esta é a maior atenuação obtida, conferindo o controle mais efetivo sobre os picos de cheia.

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados para cada cenário de diferentes áreas da bacia de detenção obtidos na simulação hidrológica, para um período de retorno de 100 anos e duração da chuva de 30 minutos.

Tabela 5.1 – Síntese dos resultados das simulações hidrológicas.

Cenário	Q <sub>M</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Vol <sub>M</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>J</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Vol <sub>J</sub> (m <sup>3</sup> )	Amortecimento Vazão (%)
15.000 m <sup>2</sup>	36,76	61100	11,56	60900	68
20.000 m <sup>2</sup>			8,62	60600	76
30.000 m <sup>2</sup>			5,45	59500	85
50.000 m <sup>2</sup>			2,88	55700	92

Q<sub>M</sub>: Vazão de pico a montante da bacia de detenção.

Vol<sub>M</sub>: Volume de pico a montante da bacia de detenção.

Q<sub>J</sub>: Vazão de pico a jusante da bacia de detenção.

Vol<sub>J</sub>: Volume de pico a jusante da bacia de detenção.

Fonte: Autor, 2025.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho de conclusão de curso tem como propósito principal avaliar a viabilidade e a eficiência da implantação de uma bacia de retenção como solução compensatória para a mitigação de inundações na bacia hidrográfica do Córrego Cercadinho, localizada no município de Belo Horizonte, Minas Gerais. Para tanto, foram realizadas modelagens hidrológicas com o software HEC-HMS, integradas a ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), especificamente o software QGIS, com vistas à análise da redução na vazão de pico, comparando os hidrograma de entrada e na saída do reservatório.

As simulações hidrológicas indicaram resultados significativos. Considerando as premissas utilizadas na modelagem para um evento de chuva com tempo de retorno de 100 anos, duração crítica da chuva de 30 minutos e uma vazão de pico inicial de 36,76 m<sup>3</sup>/s a montante, as bacias de retenção propostas foram eficazes na redução dessa vazão. A bacia de retenção com área de 15.000 m<sup>2</sup> apresentou uma atenuação de cerca de 68,5%, reduzindo a vazão para 11,56 m<sup>3</sup>/s. Estruturas com áreas maiores, como 20.000 m<sup>2</sup>, 30.000 m<sup>2</sup> e 50.000 m<sup>2</sup>, mostraram desempenhos ainda mais significativos, atingindo reduções de 76,5% (8,62 m<sup>3</sup>/s), 85,2% (5,45 m<sup>3</sup>/s) e 92,2% (2,88 m<sup>3</sup>/s), respectivamente. Tais resultados comprovam o potencial da técnica para conter picos de cheia, mesmo em cenários extremos, apresentando uma relação proporcional do aumento da área da bacia com o aumento da eficiência da bacia de retenção.

A efetividade hidrológica no amortecimento de picos de vazão foi claramente demonstrada no presente estudo, com reduções superiores a 60% na vazão de pico. Tal resultado representa uma contribuição significativa para o controle do escoamento superficial na bacia, favorecendo indiretamente a mitigação de eventos críticos de cheia. Embora seja razoável inferir que essa redução possa refletir em diminuição das áreas potencialmente inundáveis, este efeito específico não foi avaliado no presente estudo, uma vez que demandaria modelagem hidráulica.

Entretanto, é importante destacar que existem outras técnicas compensatórias com potencial significativo para o controle de inundações, que apresentam menor impacto ambiental direto e maior viabilidade em áreas urbanas densamente ocupadas, justamente por demandarem menor área individual de implantação e permitirem a aplicação em larga escala de forma

descentralizada. Essas soluções, como jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios modulares, podem ser combinadas com estruturas maiores, como a bacia de retenção, compondo estratégias integradas de drenagem urbana sustentável.

Além disso, para obtenção de resultados mais abrangentes, trabalhos futuros podem adotar diferentes premissas na simulação da bacia de retenção, como a utilização de tempos de retorno distintos e variações na duração crítica da chuva. É importante destacar que, para a implantação de obras hidráulicas de grande porte, como a proposta neste estudo, a viabilidade social deve ser considerada de forma criteriosa, garantindo a participação efetiva da comunidade em todas as etapas do processo de planejamento e execução da intervenção.

Portanto, a adoção de medidas de mitigação na Bacia do Cercadinho é indispensável, conforme evidenciado pela mancha de inundação identificada na região. Além disso, a ausência de um planejamento urbano eficaz, somada à insuficiência das atuais infraestruturas de macro e microdrenagem, impede o escoamento adequado da vazão de pico a jusante do ponto proposto para a implantação da bacia de retenção. Diante desse cenário, torna-se essencial uma análise criteriosa da viabilidade técnica, ambiental e socioeconômica da intervenção, de modo a garantir sua efetividade e aceitação pela população local. Neste trabalho, não está sendo discutida a eficiência da implantação da bacia de retenção, em termos técnicos, mas sim a apresentação de valores de referências de eficiência da redução de vazão de pico com a implementação de bacias de retenção de diferentes volumes. A necessidade de estudos de diferentes tipos de técnicas compensatórias para a otimização de critérios técnicos e ambientais precisam ser realizadas como, por exemplo a eficiência de medidas estruturais sustentáveis, como soluções baseadas na natureza (jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, etc.), e medidas não estruturais, por meio de campanhas educacionais com toda a população.

## 7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. BHO\_CN\_2018 – Base Hidrográfica Ottocodificada com Curve Number (CN). Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 25 jul. 2025.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Leandro; SENTELHAS, Paulo Cesar; MORAES, Gonçalo de; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BOITRAGO, SAMUEL ALVES; LIMA, LUIZ FERNANDO ANTUNES; LIMA, FELIPE AQUINO; LEITE, MARCOS ESDRAS; COSTA, LUIZ RICARDO FERNANDES DA. **Aplicação do Modelo HEC-HMS para Simulação do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Vieiras**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 2091–2102, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.4.p2091-2102. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/256830>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 25 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ano 149, n. 100, p. 1, 28 maio 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651.htm). Acesso em: 10 jul. 2025.

CANHOLI, Aluísio Pardo. *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/729591265/Drenagem-Urbana-e-Controle-de-Enchentes>. Acesso em: 26 jul. 2025.

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque (Org.); FERREIRA, Nelson Jesus; ASSUNÇÃO, Maria Laura. **Tempo e clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 464 p.

CHAVES, João Victor Bezerra; MENEZES, Ana Beatriz Accioly de; DANIEL JÚNIOR, Emanuel Joaquim; BASTOS, Jullius Cesar Ferreira; CIRILO, José Almir. Análise comparativa dos modelos HEC-HMS, CAWM e GR4J aplicados às sub-bacias do rio

Parnaíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 16.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA – SILUSBA, 15., 2022, Caruaru. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2022. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14267>. Acesso em: 25 jul. 2025.

CORDINI, Jucilei. **Altimetria: teoria e métodos visando a representação do relevo**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. Disponível em: <https://topografia.paginas.ufsc.br/files/2015/09/Altimetria-Apostila.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2025.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Bioma Cerrado. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/contando-ciencia/bioma-cerrado> >. Acesso em: 20 de agosto de 2022.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em 23 de agosto de 2022.

GALDINO, Renata. **Censo Demográfico: população de BH cai de 2010 a 2022**. Estado de Minas, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/06/28/interna\\_gerais,1513344/censo-demografico-populacao-de-bh-cai-de-2010-a-2022.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/06/28/interna_gerais,1513344/censo-demografico-populacao-de-bh-cai-de-2010-a-2022.shtml)>. Acesso em: 26 jul. 2025.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. TOPODATA: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

INPE, Instituto de Pesquisas Espaciais. Geologia e Geomorfologia. Geologia e Geomorfologia – Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/topicos-de-pesquisa/geologia-geomorfologia>. Acesso em 03 de fevereiro de 2025.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R.V.; SCHRÖDER, P.H.; GRANDO, A.; REGINATTO, G.M. P. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p.834-846.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p

LOPES DA SILVEIRA, André Luiz. **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p.5-29, 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>.

MACHADO, Maria Márcia Magela; DE AZEVEDO, Úrsula Ruchkys; RENGER, Friedrich Ewald. **A evolução do entendimento da geologia do quadrilátero ferífero**. Revista

Brasileira de Cartografia, [S. l.], v. 67, n. 4, p. 747–758, 2015. DOI: 10.14393/rbcv67n4-49118. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49118>. Acesso em: 25 jun. 2025.

Map Biomas. **Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Basil.** Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em 03 de fevereiro de 2025.

MENEZES, Bruno. **Volume de água no córrego Cercadinho sobe e causa prejuízo em bar no Buritis.** O TEMPO, Belo Horizonte, 29 jan. 2020. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/volume-de-agua-no-corrego-cercadinho-sobe-e-causa-prejuizo-em-bar-no-buritis-1.2290737>. Acesso em: 26 jul. 2025.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 366 p.

NAGHETTINI, Mauro. **Introdução à Hidrologia Aplicada.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2012

NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; HELLER, Léo. **Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 36–48, jan./mar. 2005. DOI: 10.1590/S1413-41522005000100005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/dQkgWPTQL8mQfGKvMmKnCyC/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PINHEIRO, Mário Cicareli. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração.** Porto Alegre: ABRH, 2011.

PINTO, L. L. C. A. (2011). **“O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano”.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas.** São Paulo: SciELO Livros, 2022. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/wphz3/pdf/piroli-9786557142981.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

PORTO, Rubem La Laina; ZAHED FILHO, Kamel; MARCELLINI, Silvana Susko. **Escoamento Superficial: Análise do Hidrograma e Hidrograma Unitário.** São Paulo: Escola Politécnica da Usp - Depto de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 1999. 47 p. PHD 307- Hidrologia Aplicada.

Prefeitura municipal de belo horizonte - PBH. **Plano Diretor Municipal de Belo Horizonte .Lei nº 11.181/19.** Belo Horizonte: PBH, 2019. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/planejamento-urbano/plano-diretor/proposta>. Acesso em: 26 jul. 2025.

Projeto águas na cidade – morar de outras maneiras (MOM). **A bacia do Cercadinho.** Belo Horizonte: UFMG, [s.d.]. Disponível em: [http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/aguas\\_no\\_cercadinho/bacia/a\\_bacia.html](http://www.mom.arq.ufmg.br/mom/aguas_no_cercadinho/bacia/a_bacia.html). Acesso em: 26 jul. 2025.

QUINTELA, A. C. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1996. Disponível em: [http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/HRH/2018\\_2019/ACQ\\_HRH\\_1996.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/HRH/2018_2019/ACQ_HRH_1996.pdf). Acesso em: 26 jul. 2025.

SANTOS, Milton (2006) **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

Secretaria de estado do meio ambiente e recursos hídricos – SUDERHSA; CH2M HILL. **Manual de Drenagem Urbana – Plano Diretor para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: SUDERHSA / CH2M HILL, Dezembro 2002. Versão 1.0. 148 p. Disponível em: [https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-07/mdu\\_versao01.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf). Acesso em: 26 jul. 2025.

SILVA OLIVEIRA, Renata. **Aprendendo com as águas: pedagogia urbana das águas na Bacia do Cercadinho**. 2023. 248 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2023.

SOUZA, Rávila Marques; CRISPIM, Diogo Coelho; FORMIGA, Klebber. **Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial–caso de estudo bacia do Córrego Samambaia**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 5, n. 2, 2012.

STRAHLER, A. N. **Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography**. Geological Society of America Bulletin, v. 63, 1952. p. 1117 - 1142.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005a.

TUCCI, Carlos E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção**. Rbrh - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p.5-12, jul/dez. 1997.

TUCCI, Carlos E. M; PORTO, Rubem La Laina; BARROS, Mário T. de. **Drenagem Urbana**. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 428 p.

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

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Gerenciamento da drenagem urbana**. Rbrh - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p.5-27, jan/mar. 2002.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Gestão da drenagem urbana**. In: CEPAL-IPEA. Textos para Discussão. Brasília: Cepal, 2012. Cap. 48. 50 p. Disponível em: . Acesso em: 09 abr. 2019.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gestão de águas pluviais urbanas. Brasil: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005. 197 p. **Programa de Modernização do Setor Saneamento Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental** - Ministério das Cidades. Disponível em: <http://www.capacidades.gov.br/media/doc/acervo/06906898a257ceb3ec8687675e9e36c8.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2024.

USACE. U.S. Army Corps Of Enginners, 2022. HEC-HMS Hydrologic Modeling System: Hydraulic Reference Manual, version 4.11. Davis, EUA: Hydrologic Engineering Center. 598 p