



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana

Matheus Filipe da Silva Pereira

**ESTUDO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICO DA BACIA DO
BARRO PRETO – MARIANA/MG: OS IMPACTOS DA
URBANIZAÇÃO NO SISTEMA DE MACRODRENAGEM**

OURO PRETO, MG

2024

ESTUDO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICO DA BACIA DO BARRO PRETO –
MARIANA/MG: OS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO SISTEMA DE
MACRODRENAGEM

Matheus Filipe da Silva Pereira

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 22/07/2024

Orientadora: Prof^a. D.Sc. Aline de Araújo Nunes – UFOP

Áreas de concentração: Saneamento e Planejamento Urbano.

OURO PRETO, MG

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436e Pereira, Matheus Filipe da Silva.

Estudo hidráulico-hidrológico da Bacia do Barro Preto - Mariana/MG
[manuscrito]: os impactos da urbanização no sistema de
macrodrenagem. / Matheus Filipe da Silva Pereira. - 2024.
99 f.: il.: color., tab.. + SIM.

Orientadora: Profa. Dra. Aline de Araújo Nunes.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Controle de inundações. 2. Saneamento. 3. Planejamento urbano.
4. Drenagem. 5. Hidrologia urbana. I. Nunes, Aline de Araújo. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 628.1:556.166

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Filipe da Silva Pereira

Estudo hidráulico-hidrológico da bacia do Barro Preto – Mariana (MG): os impactos da urbanização no sistema de macrodrenagem

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbano

Aprovada em 22 de julho de 2024

Membros da banca

Doutora - Aline de Araújo Nunes - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Denis Furstenau Plec - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Paulo de Castro Vieira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Aline de Araújo Nunes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/07/2024



Documento assinado eletronicamente por **Aline de Araujo Nunes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/07/2024, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0744881** e o código CRC **375794D5**.

*“To play a wrong note is insignificant; to play
without passion is inexcusable.”*

— Ludwig van Beethoven

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José e Cássia, à minha irmã Bárbara e à minha madrinha Maria, que sempre me incentivaram nos estudos e em projetos independentes, sempre com ensinamentos importantes sobre a vida e as pessoas.

Aos meus professores do Ensino Médio e do Técnico, por me proporcionarem conhecimentos importantes de automatização de processos e melhoria das minhas habilidades de apresentação oral.

Aos professores do Ensino Superior da UFOP: Aline Nunes, por despertar meu interesse na área de Recursos Hídricos e sempre trazer informações atualizadas no âmbito de Drenagem Urbana Sustentável e Modelos Hidrológicos; Paulo Vieira, por trazer novas visões sobre o desenvolvimento sustentável e Saneamento Básico; Denis Plec, pelos ensinamentos em Modelagens Hidráulicas e soluções de engenharia de prevenção e controle de cheias urbanas; Tamara Souza, pelos ensinamentos em Hidráulica e pela oportunidade na Iniciação Científica na área de Saneamento; Pedro Alameda, pelos ensinamentos em Python em Métodos Computacionais. Prof. Christiano Ottoni, pelos ensinamentos em planejamento urbano e geoprocessamento. E demais professores do Departamento de Engenharia Urbana – DEURB por toda a parceria e aprendizado em todo esse período de graduação.

Aos meus amigos e colegas da UFOP pelos trabalhos em grupo, parcerias, conversas descontraídas e companheirismo em todo esse período de formação.

Por fim, agradeço imensamente a Escola de Minas e a Universidade Federal de Ouro Preto por proporcionar toda a estrutura de salas, laboratórios, apoio em Pesquisa e Extensão durante a minha graduação.

RESUMO

Os córregos e rios urbanos desempenham um papel crucial na drenagem das bacias hidrográficas e na manutenção da flora e fauna aquáticas. No entanto, o processo de urbanização tem gerado problemas ambientais e sanitários significativos. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo investigar os impactos da urbanização na bacia do Barro Preto, localizada em Mariana (MG), com foco na macrodrenagem e na gestão de riscos de inundação, considerando os cenários de uso e ocupação do solo dos anos de 2007 e 2024. O estudo utilizou modelos hidrológicos para simular chuvas de diferentes intensidades e ferramentas de geoprocessamento para obter parâmetros de entrada. A urbanização intensa nos últimos 17 anos na bacia do Barro Preto resultou em um aumento expressivo das áreas impermeabilizadas e na redução das áreas naturais. As zonas residenciais aumentaram em 255,45%, enquanto as áreas naturais diminuíram em até 71,70%. Isso levou a um aumento substancial das vazões de escoamento superficial, que, em um tempo de retorno (TR) de 10 anos, quase dobrou, com um aumento de 92%. Para os TR de 25 e 50 anos, os aumentos foram de 72% e 62%, respectivamente. Os resultados mostram que o sistema de macrodrenagem atual não suporta as vazões projetadas para 2024. Entre as recomendações para melhorias nas infraestruturas e políticas públicas, destaca-se a elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana para diagnosticar as redes e definir especificações técnicas para estudos hidrológicos e hidráulicos. A manutenção regular, incluindo limpezas e desassoreamento dos córregos, é fundamental para garantir o desempenho das estruturas de macrodrenagem existentes. Assim, o estudo ressalta a importância de políticas públicas eficazes para a gestão do uso e ocupação do solo, visando reduzir os impactos ambientais e prevenir a poluição dos corpos hídricos. A adoção de medidas sustentáveis e estratégias de mitigação é crucial para melhorar a resiliência da bacia do Barro Preto frente aos eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: urbanização, macrodrenagem, bacia hidrográfica, geoprocessamento, gestão de riscos, inundação, sustentabilidade.

ABSTRACT

Urban streams and rivers play a crucial role in watershed drainage and the maintenance of aquatic flora and fauna. However, the process of urbanization has generated significant environmental and sanitary problems. In this context, the present study aims to investigate the impacts of urbanization on the Barro Preto basin, located in Mariana (MG), focusing on macro-drainage and flood risk management, considering the land use and occupation scenarios of the years 2007 and 2024. The study used hydrological models to simulate rainfall of different intensities and geoprocessing tools to obtain input parameters. Intense urbanization over the past 17 years in the Barro Preto basin has resulted in a significant increase in impermeable areas and a reduction in natural areas. Residential zones increased by 255.45%, while natural areas decreased by up to 71.70%. This led to a substantial increase in surface runoff flows, which, in a 10-year return interval (RI), almost doubled, with a 92% increase. For RI's of 25 and 50 years, the increases were 72% and 62%, respectively. The results show that the current macro-drainage system cannot support the projected flows for 2024. Among the recommendations for improvements in infrastructure and public policies, the development of an Urban Drainage Master Plan stands out to diagnose the networks and define technical specifications for hydrological and hydraulic studies. Regular maintenance, including cleaning and dredging of streams, is essential to ensure the performance of existing macro-drainage structures. Thus, the study emphasizes the importance of effective public policies for the management of land use and occupation, aiming to reduce environmental impacts and prevent pollution of water bodies. The adoption of sustainable measures and mitigation strategies is crucial to improve the resilience of the Barro Preto basin in the face of extreme hydrological events.

Keywords: urbanization, macro-drainage, watershed, geoprocessing, risk management, flooding, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica	5
Figura 2 - Hidrogramas de áreas urbanizadas e não urbanizadas.....	9
Figura 3 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação	10
Figura 4 - Minas Gerais, mesorregiões e microrregiões.....	15
Figura 5 – Trechos da Hidrografia principal.....	17
Figura 6 - Evolução da mancha urbana ao longo dos anos	18
Figura 7 – Mapa hipsométrico e de declividade da bacia do Barro Preto	19
Figura 8 – Sub-bacias do Barro Preto	22
Figura 9 – Modelo topológico das simulações hidrológicas	23
Figura 10 - Mapa de uso e ocupação do solo de cada cenário.....	24
Figura 11 - Mapa de solos da bacia do Barro Preto	26
Figura 12 - Exultório da área de estudo	31
Figura 13 - Inundação na Travessa Monsenhor Rafael Coelho (Trecho 2).....	32
Figura 14 - Inundação do Trecho 4 a jusante do bueiro	32
Figura 15 - Mapa de localização dos trechos do talvegue principal	33
Figura 16 - Canal aberto (Trecho 4) com emboque do canal fechado (Trecho 5).....	34
Figura 17 - Canal assoreado do Trecho 4 com bueiro ao fundo (Trecho 3).....	35
Figura 18 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 10 anos	42

Figura 19 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 25 anos	43
Figura 20 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 50 anos	43
Figura 21 - Seção transversal do canal para o cenário de 2007	46
Figura 22 - Seção transversal do canal para o evento de fevereiro de 2023	47
Figura 23 - Seção transversal do Trecho 4 em 2024, dimensões medidas <i>in loco</i> ...	49
Figura 24 - Capacidade do microreservatório	53
Figura 25 - Representação visual do canal do Trecho 4 (sem escala).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas de drenagem das sub-bacias do Barro Preto.....	22
Tabela 2 - Valores de CN adotados para cada tipologia de uso e ocupação do solo	26
Tabela 3 - Resumo do CN ponderado calculado para cada sub-bacia	27
Tabela 4 - Parâmetros calculados para as sub-bacias, incluindo o tempo de concentração e <i>LagTime</i>	28
Tabela 5 - Quantis de Chuva para diferentes durações e Tempos de Retorno para Mariana - MG	30
Tabela 6 - Parâmetros dos Trechos 4 e 5	33
Tabela 7 - Síntese dos parâmetros morfométricos.....	40
Tabela 8 - Quantitativos de áreas referente a cada tipologia de uso e ocupação	41
Tabela 9 - Resumo das vazões de pico em cada cenário	42
Tabela 10 - Resumo dos volumes em cada cenário	42
Tabela 11 - Parâmetros hidráulicos do Trecho 4 para o evento de inundação (TR de 10 anos)	45
Tabela 12 - Parâmetros hidráulicos do cenário de 2024 para TR de 25 anos	49
Tabela 13 – Dimensões e parâmetros hidráulicos do Trecho 4 – TR 25 anos.....	55

LISTA DE SIGLAS

ABC 6 – Análise de Bacias Complexas

APP – Áreas de Preservação Permanente

CN – *Curve Number*

HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*

IDF – Intensidade-duração-frequência

MDT's – Modelos Digitais de Terreno

PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SWMM – *Storm Water Management Model*

TC – Técnicas Compensatórias

TR – Tempo de Retorno

UFV – Universidade Federal de Viçosa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVO	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS	4
2.2 URBANIZAÇÃO E OS IMPACTOS NA DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	7
2.3 GEOPROCESSAMENTO EM AMBIENTES URBANOS.....	11
2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	12
2.4.1 Programa HEC-HMS	12
2.4.2 Método SCS e Número de Curva (CN)	13
3 METODOLOGIA	15
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
3.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA	19
3.3 MODELAGEM DOS FENÔMENOS HIDROLÓGICOS – CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS	20

3.3.1	Caracterização do modelo hidrológico semi-distribuído e delimitação das sub-bacias	20
3.3.2	Construção dos cenários de modelagem hidrológica	23
3.3.3	Tempo de Concentração	27
3.3.4	Chuvas de projeto	29
3.4	AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DAS ESTRUTURAS DE MACRODRENAGEM	31
3.5	AVALIAÇÃO DO PLANO DIRETOR QUANTO À DRENAGEM URBANA ...	37
3.6	PROPOSIÇÕES DE MELHORIA DA QUALIDADE E CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CÓRREGO	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS	40
4.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA	41
4.3	ANÁLISE DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CANAL	45
4.4	AVALIAÇÃO DO PLANO DIRETOR QUANTO À DRENAGEM URBANA ...	50
4.5	PROPOSIÇÕES DE MELHORIA DA QUALIDADE E CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CÓRREGO	53
4.5.1	Medidas estruturais.....	54
4.5.2	Medidas não estruturais	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59

REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A – PERFIS LONGITUDINAIS DA HIDROGRAFIA PRINCIPAL DE CADA SUB-BACIA E TRECHOS DE RIO.....	66
APÊNDICE B – CHUVAS DE PROJETO	70
B.1 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 30 MINUTOS.....	70
B.2 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1 HORA.....	71
B.3 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1,5 HORA.....	73
B.4 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 2 HORAS	76
APÊNDICE C – HIDROGRAMAS DE CHEIAS	80
C.1 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 10 ANOS.....	80
C.2 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 25 ANOS.....	81
C.3 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 50 ANOS.....	82
C.4 VAZÕES DE PICO PARA CADA TEMPO DE RETORNO E DURAÇÃO .	84
C.5 VOLUMES PARA CADA TEMPO DE RETORNO E DURAÇÃO	84

1 INTRODUÇÃO

Os córregos e rios urbanos são fundamentais para a drenagem de bacias hidrográficas e manutenção da flora e fauna aquáticas. Contudo, o intenso processo de antropização nas cidades vem contribuindo com uma série de problemáticas ambientais e sanitárias, a exemplo do despejo de efluentes domésticos sem o devido tratamento nos corpos hídricos. Além disso, esse processo de urbanização contribui diretamente com a impermeabilização das superfícies e, conseqüentemente, com o aumento do escoamento superficial das águas pluviais.

Diante disso, esse aumento da vazão se torna expressivo e devastador em alguns casos, podendo trazer prejuízos ambientais, econômicos e sociais para uma população afetada com um determinado evento hidrológico. Sendo assim, entender o processo de urbanização e sua relação com o meio físico de uma bacia é indispensável para uma gestão e gerenciamento adequados dos riscos associados às fortes chuvas e aos fenômenos de inundação e alagamento.

O uso de modelos hidrológicos associados às ferramentas de geoprocessamento tem sido adotado em cidades do Brasil e de todo o mundo. Essas tecnologias permitem simular chuvas de diferentes intensidades para uma determinada bacia, trazendo uma série de benefícios quanto ao dimensionamento adequado de infraestruturas de drenagem urbana. Complementarmente, os resultados gerados pelos modelos possibilitam a criação de estratégias de gestão de risco de desastres nas cidades.

Entretanto, na maioria das cidades brasileiras, a gestão e gerenciamento das águas pluviais não é habitual, apesar das legislações existentes. Em Mariana (MG), muitas estruturas de micro e macrodrenagem não são mapeadas, com ligações irregulares e redes de esgotamento sanitário em alguns trechos, e dificilmente são contempladas com limpeza e manutenção adequada. Tais fatores, quando associados aos desafios do meio urbano, podem agravar eventos de inundação e alagamentos.

Sendo assim, o presente estudo visa entender o impacto das vazões de pico no sistema de macrodrenagem existente na bacia do Barro Preto, localizada em Mariana, levando em consideração diferentes cenários de ocupação territorial.

1.1 JUSTIFICATIVA

Entender a influência da expansão urbana em diferentes partes do território de uma cidade é essencial para garantir uma gestão de riscos adequada. No entanto, quando essa expansão não é controlada efetivamente pelo município, destaca-se os impactos negativos no ciclo hidrológico, com o aumento da impermeabilização do terreno e aumento do escoamento superficial das águas pluviais.

Sendo assim, conhecer as vazões de pico no exutório das sub-bacias de uma cidade é importante para haver um melhor planejamento e dimensionamento adequado das estruturas de macrodrenagem como, por exemplo, canais e galerias pluviais. Quando tais estruturas não são dimensionadas corretamente, associado à falta de controle da urbanização em áreas próximas aos cursos d'água, eventos de inundação e alagamentos acabam sendo agravados. Dessa forma, um planejamento inadequado pode levar a riscos de colapso e danos significativos à infraestrutura, representando ameaças sérias para a vida e a economia das cidades.

Assim, a utilização de ferramentas de modelagem hidrológica pode contribuir com a previsão e simulação de eventos hidrológicos em uma bacia, avaliação do impacto da atividade humana nos recursos hídricos, no planejamento e gestão dos recursos hídricos e em estudos relacionados às mudanças climáticas. Como estudo de caso desta pesquisa tem-se a sub-bacia do Barro Preto, localizada em Mariana – MG, constantemente impactada por eventos extremos de chuva.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo hidráulico-hidrológico da sub-bacia do Barro Preto, localizada na cidade de Mariana – MG, com o intuito de verificar a influência da ocupação urbana na formação de vazões de escoamento superficial.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- A simulação de cenários de uso e ocupação do solo em condições anteriores e posteriores ao processo de ocupação territorial.
- Determinar as vazões máximas de escoamento superficial para os cenários supracitados, considerando diferentes Tempos de Retorno (TR).
- Verificar o impacto das vazões máximas geradas no sistema de macrodrenagem localizado no exutório da bacia.
- Analisar as legislações vigentes quanto à implementação de novos empreendimentos, principalmente no que tange à exigência de estudos hidráulicos e hidrológicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

As bacias hidrográficas podem ser entendidas como superfícies terrestres delimitadas por divisões topográficas que captam a água precipitada e escoam até um único ponto de saída (exutório). Essa área é caracterizada pela interconexão de cursos d'água, que formam a rede hidrográfica, e pela sua drenagem natural das águas pluviais. É importante estudar as bacias hidrográficas para analisar processos relacionados ao ciclo hidrológico, que compreende as etapas de evaporação, transpiração, condensação, precipitação e infiltração (TUCCI, 2001).

O ciclo hidrológico, por sua vez, pode ser entendido como um fenômeno natural, fechado em nível global, no qual ocorre a troca de água entre a atmosfera, a superfície terrestre e os corpos d'água, sendo impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. Ele envolve a evaporação da água dos solos, rios, lagos e oceanos para a atmosfera, a formação de nuvens, a precipitação na forma de chuva ou neve, a infiltração da água no solo, a recarga de aquíferos subterrâneos, o escoamento superficial de água nos rios, córregos e riachos, e, finalmente, o retorno da água para os oceanos (TUCCI, 2001).

Assim, a bacia hidrográfica pode ser considerada uma unidade sistêmica, resultante da interação da água e outros recursos naturais como o relevo, vegetação e clima, onde é realizado um balanço de entradas e saídas da água precipitada pelo exutório (PORTO; PORTO, 2008). A Figura 1 apresenta a interação do ciclo hidrológico que ocorre em uma determinada bacia hidrográfica.

Além do ciclo hidrológico nas bacias, Villela e Mattos (1975) salientam a grande influência do relevo para fatores hidrológicos e meteorológicos, seja pela velocidade de escoamento superficial, influenciada pela declividade do terreno, ou pela altitude.

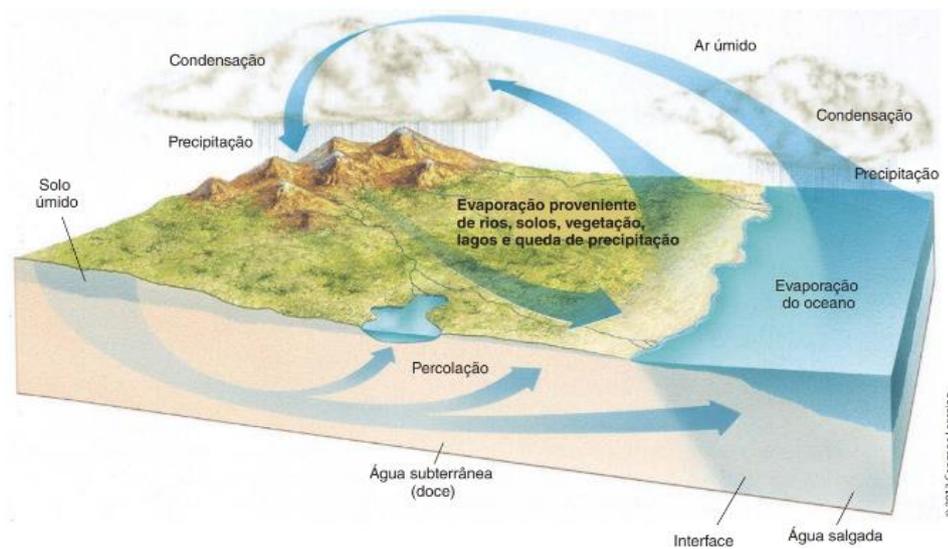


Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica

Fonte: WICANDER e MONROE (2017).

De acordo com Tonello *et al.* (2006), as características físicas e bióticas de uma bacia influenciam diretamente nos processos naturais do ciclo hidrológico como a infiltração, escoamento superficial e subsuperficial, dentre outros. Assim, o Quadro 1 apresenta alguns parâmetros morfométricos comumente analisados em estudos hidrológicos.

Complementarmente, tais características morfométricas podem influenciar diretamente no tempo de concentração de uma bacia. O tempo de concentração pode ser entendido como o tempo necessário para que toda a bacia contribua na seção de saída. Tal parâmetro hidrológico se baseia na suposição de que a bacia hidrográfica tem uma resposta linear ao escoamento superficial direto. Em tal suposição, o tempo de concentração é o tempo de equilíbrio quando há um regime permanente entre uma chuva efetiva de intensidade constante e o escoamento superficial direto resultante (SILVEIRA, 2005).

Quadro 1 - Parâmetros morfométricos de uma bacia hidrográfica

Parâmetro	Fórmula	Unidade	Definição
Área de drenagem	A	km^2	Área plana definida pelo divisor de águas, obtida por planimetria (VILLELA; MATTOS, 1975)
Perímetro da bacia	P	km	Comprimento medido ao longo do divisor de águas (VILLELA; MATTOS, 1975)
Comprimento do curso d'água principal	L	km	Comprimento do curso d'água de maior volume da nascente ao exutório (VILLELA; MATTOS, 1975)
Comprimento total de todos os cursos d'água	L_{tot}	km	Soma de todos os comprimentos dos rios que constituem a bacia (VILLELA; MATTOS, 1975)
Coeficiente de compacidade	$k_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Ad	Relação entre o perímetro da bacia e uma circunferência de área igual (VILLELA; MATTOS, 1975)
Coeficiente de forma	$k_f = \frac{A}{L^2}$	Ad	Relação entre a largura média da bacia e o comprimento axial do rio principal (VILLELA; MATTOS, 1975)
Densidade de drenagem	$D_d = \frac{L_{tot}}{A}$	km/km^2	Relação entre o comprimento total dos rios e a área de drenagem (VILLELA; MATTOS, 1975)
Ordem dos cursos d'água	$i + 1$	Ad	Classificação dos rios que indica o grau de ramificação dentro de uma bacia (VILLELA; MATTOS, 1975)

Quadro 1 - Parâmetros morfométricos de uma bacia hidrográfica

(continuação)

Parâmetro	Fórmula	Unidade	Definição
Declividade equivalente do curso d'água principal	$S_3 = \left[\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right)} \right]^2$	<i>m/m</i>	Declividade equivalente a um curso d'água de declividade constante (VILLELA; MATTOS, 1975)
Observações: Li: comprimento de cada trecho de rio (m); Si: declividade de cada trecho de rio			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, Silveira (2005) destaca que há uma incerteza na definição do tempo de concentração que afeta as fórmulas para cálculo. Há diversas formulações de tempo de concentração aplicadas em diferentes cenários, que dependendo da utilização, podem superestimar ou subestimar o mesmo.

Considerando as características expostas, Araújo et al. (2009) enfatizam a importância de ter as bacias hidrográficas como referencial no planejamento e gestão territorial, de modo a haver a conciliação do desenvolvimento econômico e preservação ambiental, visando a integração dos agentes físicos, econômicos e sociais. Sendo assim, é preciso também entender como a urbanização vem impactando os processos naturais que ocorrem nas bacias hidrográficas.

2.2 URBANIZAÇÃO E OS IMPACTOS NA DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

A água é um bem essencial tanto para os processos naturais quanto para a manutenção da vida. Entretanto, com o passar dos anos, processos antrópicos e mudanças ambientais acabaram gerando contaminações dos corpos hídricos, assoreamento de estruturas e córregos, impermeabilização das superfícies, dentre outros. Com isso, muitas bacias tiveram suas características físicas alteradas.

A relação do ser humano com os rios nas cidades segue uma trajetória complexa, associada a intensas modificações do meio biótico em função das necessidades da sociedade que se forma. Isso se evidencia pela necessidade da água para o consumo, irrigação, atividades agrícolas, higiene pessoal, dentre outros. Mello (2005) aponta que os espaços próximos aos rios são bem requisitados pelo histórico da humanidade, o que vale tanto para as ocupações da população ribeirinha, quanto para as urbanizações tradicionais das margens de grandes rios que cruzam cidades.

Com o passar do tempo, os rios viabilizaram a civilização e são diretamente afetados à medida que ocorre o crescimento urbano. Ainda no começo das ocupações urbanas, nas Idades Antiga e Média, os cursos d'água começaram a ser impactados pelas atividades inerentes ao processo de urbanização, como o despejo de cargas de esgotamento sanitário, resíduos sólidos, poluição difusa, dentre outros (BAPTISTA; CARDOSO, 2013).

Já no final do século XIX e começo do século XX, no cenário internacional, conforme enfatizado por Tucci (2008), o despejo de esgotamento sanitário nos mananciais, sem o devido tratamento, tinha a finalidade de evitar doenças de veiculação hídrica, justamente por transferir os impactos à jusante. No entanto, após a explosão do crescimento populacional, acelerado pela Segunda Guerra Mundial, grande parte da população migrou para as cidades, acarretando um colapso sanitário em função da poluição dos mananciais.

Pode-se dizer, então, que a própria história da civilização está intimamente ligada aos rios, lagos e mares por questões culturais, além da necessidade deste recurso para a sobrevivência (BAPTISTA; CARDOSO, 2013). Atualmente, existem legislações que regulam o uso da água, assim como o uso e ocupação do solo, a exemplo do Código Florestal, que estabelece faixas marginais de cursos d'água como Áreas de Preservação Permanente – APP.

Diante disso, ao passo que a cidade se urbaniza, é possível observar o aumento das vazões de escoamento superficial em função da impermeabilização das superfícies e do aumento da capacidade de escoamento de condutos, canais e galerias. Dessa forma, as enchentes causadas pela urbanização estão diretamente associadas ao parcelamento do solo de forma intensa, que gera impermeabilizações de grandes superfícies, ocupação em áreas ribeirinhas, obstruções de canais por sedimentos e resíduos, dimensionamento inadequados das infraestruturas, dentre outros (TUCCI, 2007).

De forma ilustrativa, na Figura 2 observa-se um hidrograma no qual a área urbanizada gera uma maior vazão de pico, em um menor tempo de ocorrência, em detrimento à área não urbanizada. Tal observação se justifica pelo aumento do escoamento superficial potencializado pelos fatores supracitados.

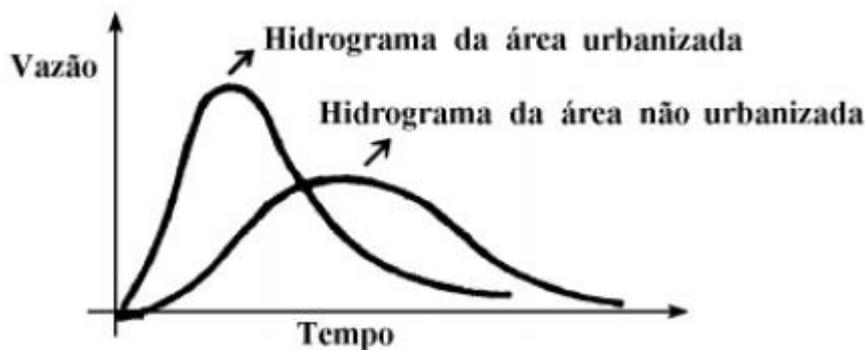


Figura 2 - Hidrogramas de áreas urbanizadas e não urbanizadas

Fonte: Tucci *et al.* (1995)

Nessa ótica, as enchentes e inundações são fenômenos naturais que ocorrem com uma certa periodicidade nos cursos d'água. Tais fenômenos, no entanto, podem ser agravados pela ocorrência de chuvas intensas, e ampliados pela ação antrópica (VARGAS; WERNECK; FERREIRA, 2008).

Em termos conceituais, conforme demonstrado na Figura 3, enchentes ou cheias são caracterizadas pela elevação temporária no nível de água em um determinado canal como consequência do aumento da vazão. As inundações, por sua vez, ocorrem quando há um extravasamento das águas de um canal, atingindo o leito maior ou planície de inundação. Já os alagamentos são acúmulos temporários da água em uma área, causados por uma deficiência do sistema de drenagem (BRASIL, 2007).



Figura 3 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação

Fonte: BRASIL (2007).

Nesse retrospecto, o processo de urbanização altera a morfologia natural dos cursos d'água, em função das obras de canalização e retificação, e também altera a dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica. Logo, entender as distribuições das ocupações no meio físico e suas interações no espaço é muito importante. Assim, o uso de tecnologias como o geoprocessamento e informatização dos dados são estratégias eficazes para melhorar a gestão urbana municipal.

2.3 GEOPROCESSAMENTO EM AMBIENTES URBANOS

Com a crescente urbanização das cidades, aumenta-se a complexidade dos sistemas presentes nos ambientes urbanos. Nesse sentido, o geoprocessamento desempenha um papel fundamental no planejamento e gestão territorial das cidades, sendo uma ferramenta eficaz de entendimento do espaço, além de poder auxiliar na formulação de políticas públicas.

O geoprocessamento surgiu a partir de novas tendências de tratamento de dados para serem aplicados no planejamento e gestão urbana de forma integrada e multidisciplinar. Com as evoluções tecnológicas, os sistemas de geoprocessamento contribuíram com o surgimento dos Modelos Digitais de Terreno – MDT's, cartografia digital, computação gráfica e sistemas de gerenciamento de banco de dados (PEREIRA; SILVA, 2001).

O Sistema de Informação Geográfica – SIG pode ser entendido como um sistema que representa o mundo real. Tais sistemas são constituídos por *softwares*, *hardware* e dados geográficos, e são usados para cruzar informações espaciais, gerar produtos como mapas, trazendo um enorme horizonte para atividades associadas à análise, planejamento, gestão e projetos (PEREIRA; SILVA, 2001).

Por meio do geoprocessamento é possível verificar as condições atuais e simular o impacto das transformações e crescimentos das cidades de forma visual (REIS FILHO; MOURA, 2014). No contexto hidrológico, o geoprocessamento é uma ferramenta importante para realizar o mapeamento de áreas susceptíveis à inundação, sobrepor informações georreferenciadas, mostrar a evolução do uso e ocupação do solo para que, assim, seja possível entender diversos processos naturais e antrópicos atuantes em uma bacia hidrográfica (GOMES, 2014).

Assim, o geoprocessamento é uma ferramenta muito eficaz para modelagens hidrológicas, seja pela facilidade de importação das camadas vetoriais para uma

representação visual quanto para extrair parâmetros fisiográficos para ser incorporado no modelo hidrológico.

2.4 Modelagem Hidrológica

Conforme Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que melhor entende e representa o comportamento de uma bacia hidrográfica de forma artificial. É nele que será possível compreender os complexos fenômenos naturais atuantes na bacia, por meio de levantamentos de dados, formulações matemáticas e estocásticas.

Escarião (2001) enfatiza a importância dos modelos hidrológicos para profissionais das áreas de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos pela razão de possibilitar a quantificação dos volumes hídricos disponíveis, fornecendo informações pertinentes para a tomada de decisões em uma área.

Dentre os *softwares* gratuitos existentes de modelagem hidrológica, pode-se destacar o ABC 6 - Análise de Bacias Complexas, o SWMM (*Storm Water Management Model*) e o HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*). Cada programa tem suas especificidades e limitações. Tanto o SWMM quanto o HEC-HMS são modelos de simulação de transformação chuva-vazão, que podem ser utilizados para eventos únicos ou simulações contínuas. As variáveis de interesse são, normalmente, o tempo e a vazão de pico ou o hidrograma total do escoamento (SOUZA; CRISPIM; FORMIGA, 2012).

2.4.1 Programa HEC-HMS

O HEC-HMS é um *software* de modelagem hidrológica desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center* – HEC) dos Estados Unidos. É muito utilizado para a simulação e previsão de cenários nas bacias hidrográficas mediante a ocorrência de eventos de precipitação (USACE, 2022).

Assim, o HEC-HMS permite o desenvolvimento de modelos hidrológicos bem detalhados, considerando as características físicas da bacia hidrográfica, condições climáticas, as precipitações e escoamento. Tais modelos podem envolver a divisão da área em várias sub-bacias, podendo calcular a vazão gerada por cada sub-bacia, bem como a integração do sistema de sub-bacias, considerando o ponto mais distante até o ponto de controle final (exutório) (USACE, 2022).

Dessa forma, o HEC-HMS pode ser aplicado em grandes e pequenas bacias hidrográficas. Os resultados produzidos no modelo podem ser analisados em conjunto com outros softwares para estudos de drenagem urbana, impactos do processo de urbanização, projetos de reservatórios, planejamento de sistemas de previsão e alerta, disponibilidade hídrica, dentre outros (GIORDANI, 2018).

Outrossim, o HEC-HMS trabalha com alguns dados de entrada da bacia hidrográfica e dados meteorológicos para a simulação hidrológica, além das especificações de controle. O programa trabalha com vários métodos de perdas e transformação chuva-vazão, sendo o mais utilizado o modelo chuva-vazão do SCS, que leva em consideração como parâmetros de entrada o Número de Curva (*Curve Number - CN*), Área impermeável (*Impervious*), Tempo de Retardo (*Lag Time*), dentre outros. Ainda, é possível importar arquivos georreferenciados das bacias de estudo em formato *shapefile* para melhorar a representação visual do modelo.

2.4.2 Método SCS e Número de Curva (CN)

O método do *Soil Conservation Service* (SCS) é um método que objetiva estimar a transformação direta da precipitação em escoamento superficial e foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1957). Com o passar dos anos, o método SCS-CN se tornou consagrado no âmbito da engenharia de recursos hídricos, sendo que o modelo é amplamente aplicado em diversos segmentos e estendido para cenários mais diversos do que foi empregado em suas formulações iniciais (CUNHA *et al.*, 2015).

O método SCS é amplamente aceito por sua simplicidade, autoridade da instituição criadora e pelo número limitado de parâmetros de entrada. O método se baseia no conceito de que a chuva que precipita em uma determinada área pode ser dividida em escoamento superficial, infiltração do solo e evapotranspiração. O método de transformação da chuva-vazão é o método do hidrograma unitário (PONCE; HAWKINS, 1996).

Assim, estima-se o escoamento superficial com base na lâmina de escoamento que flui sobre a superfície do solo. Para a infiltração, utiliza-se o parâmetro CN que representa as perdas envolvidas no processo infiltração, seja pela retenção em partes do terreno, cobertura vegetal, dentre outros (PONCE; HAWKINS, 1996).

Diante disso, o CN é um valor adimensional que varia entre 1 a 100, sendo este relacionado com a impermeabilidade da superfície, ou seja, quanto maior o CN, maior será a impermeabilização e menor será a retenção da chuva (S) (PEREIRA, 2009). Uma consideração importante sobre o método SCS, conforme destacado por Ponce e Hawkins (1996), é que ele foi desenvolvido com base em dados de uma região específica. Sendo assim, recomenda-se cautela ao aplicar esses valores em outras regiões com diferentes condições climáticas e geográficas.

Assim, após o entendimento desses conceitos abordados, pode-se se dar prosseguimento a próxima etapa que irá descrever os procedimentos metodológicos do estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Doce, situada na região sudeste do Brasil, abrange uma área de aproximadamente 86.715 km², envolvendo os estados de Minas Gerais (86% do território) e Espírito Santo (14%). O relevo da bacia é ondulado, montanhoso e acidentado e todas as suas nascentes estão localizadas em Minas Gerais (CBH-DOCE, 2024).

Localizado na bacia do Rio Doce, o município de Mariana está situado no estado de Minas Gerais, na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte e na microrregião de Ouro Preto (Figura 4). A microrregião é formada pelos municípios: Ouro Preto, com aproximadamente 74 mil habitantes; Mariana, com aproximadamente 61 mil habitantes; Itabirito, com aproximadamente 52 mil habitantes; e Diogo de Vasconcelos, com 4 mil habitantes (IBGE CIDADES, 2022).

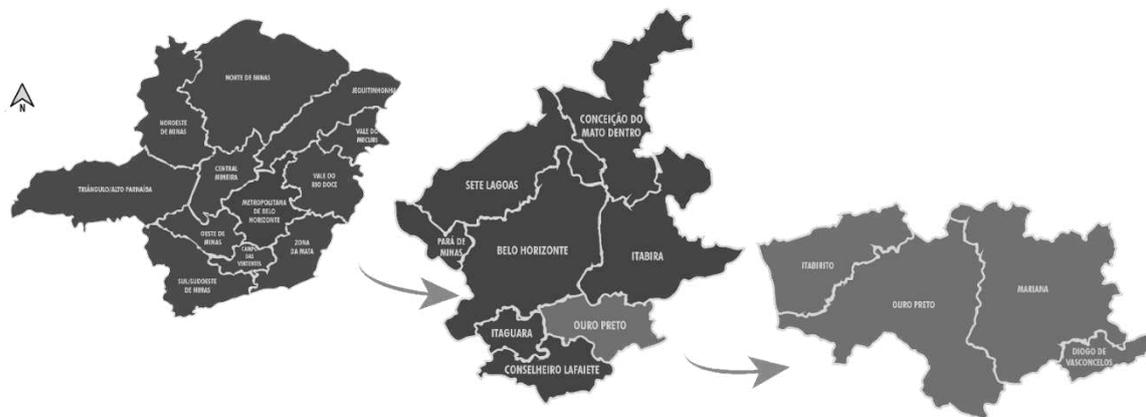


Figura 4 - Minas Gerais, mesorregiões e microrregiões

Fonte: Adaptado de Diretório De Ruas (2019).

Mariana foi a primeira capital e primeira cidade a ter um planejamento urbano e territorial no estado de Minas Gerais. Entretanto, segundo Souza (2004, p.35), desde a década de 70, a omissão da gestão municipal para a criação de políticas públicas de ordenamento territorial contribuiu para o crescimento desordenado. Isso traz uma série de problemas para a população que ocupou as áreas de risco, muitas delas provocadas pelos movimentos gravitacionais de massa e inundações.

Diante disso, a área de estudo é uma sub-bacia que compreende vários bairros. Tal sub-bacia tem a nascente localizada no bairro Rosário e o ponto de exutório localizado no bairro Barro Preto. O córrego da sub-bacia não tem nome oficial e deságua no Rio do Carmo. Para uma melhor compreensão da área de estudo, a hidrografia principal foi dividida em trechos (Figura 5), onde:

- **Trecho 1:** Corresponde ao trecho em leito natural, sendo este o mais longo da bacia. Nele há uma declividade mais acentuada e há presença de vegetação densa margeando ao longo do trajeto. Neste trecho, há muito descarte de efluentes domésticos, além de outros tipos resíduos sólidos por parte da população.
- **Trecho 2:** Canalização em concreto de formato retangular, passando embaixo da Travessa Monsenhor Rafael Coelho.
- **Trecho 3:** Bueiro Celular em concreto, perpendicular à Travessa Monsenhor Rafael Coelho.
- **Trecho 4:** Canalização em concreto a jusante do bueiro. Em 2023 o canal era totalmente fechado. Em 2024, ele foi aberto pela Prefeitura.
- **Trecho 5:** Canalização total do curso d'água, onde há um estrangulamento em termos de altura do canal. O trajeto passa por baixo de vias e casas, e desemboca no Ribeirão do Carmo.

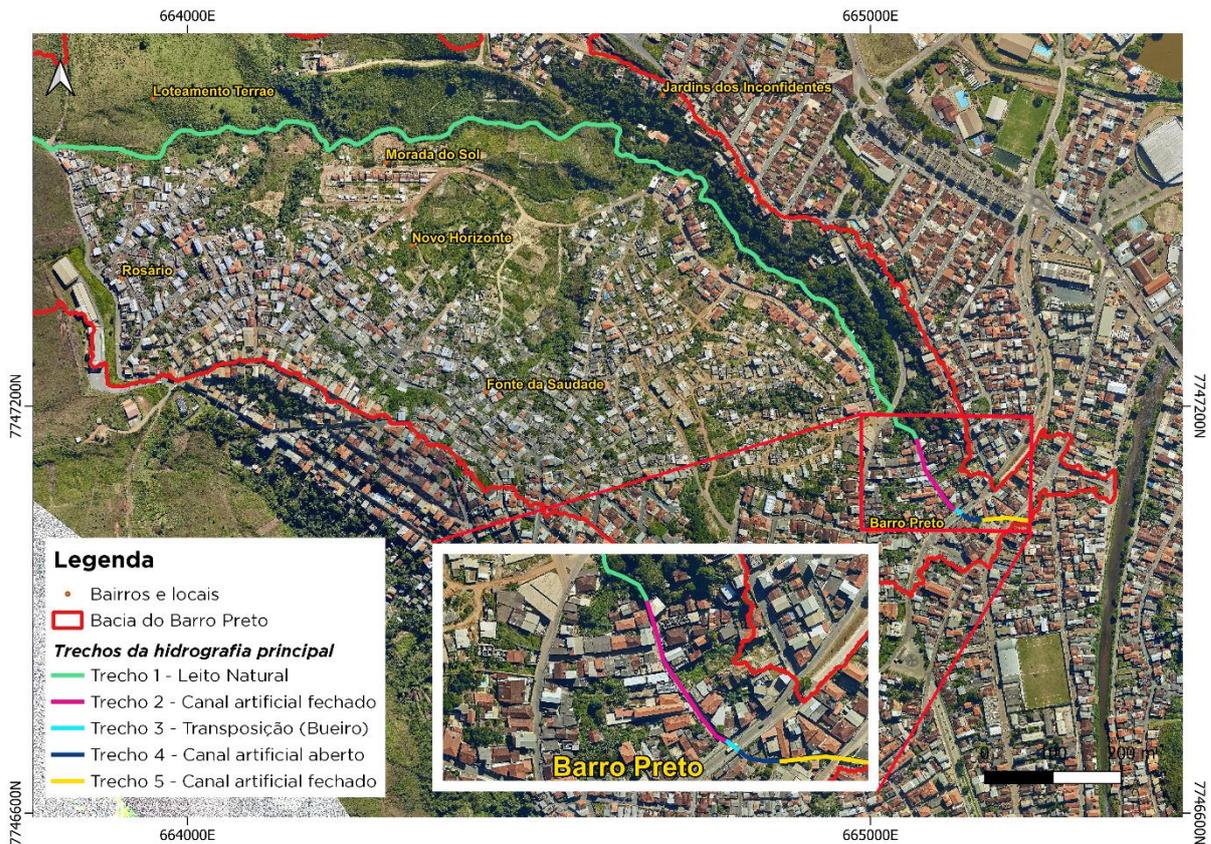


Figura 5 – Trechos da Hidrografia principal

O bairro Novo Horizonte e uma parte do bairro Morada do Sol surgiram de um processo de ocupação urbana espontânea e desordenada. Tal expansão pode ser visualizada na Figura 6. Essa ocupação foi formalizada pela prefeitura, que levou iluminação pública, pavimentação asfáltica nas vias, posteamento com energia elétrica, abastecimento de água, dentre outros. Vale ressaltar que muitas redes de esgotamento sanitário foram instaladas pelos próprios moradores e dispostas diretamente nos córregos sem o devido tratamento. Também, não há o cadastro das estruturas de macrodrenagem e nem um manual técnico municipal para dimensionamento de estruturas de drenagem. Ainda, há o lançamento irregular de resíduos sólidos pela população marginal do córrego.

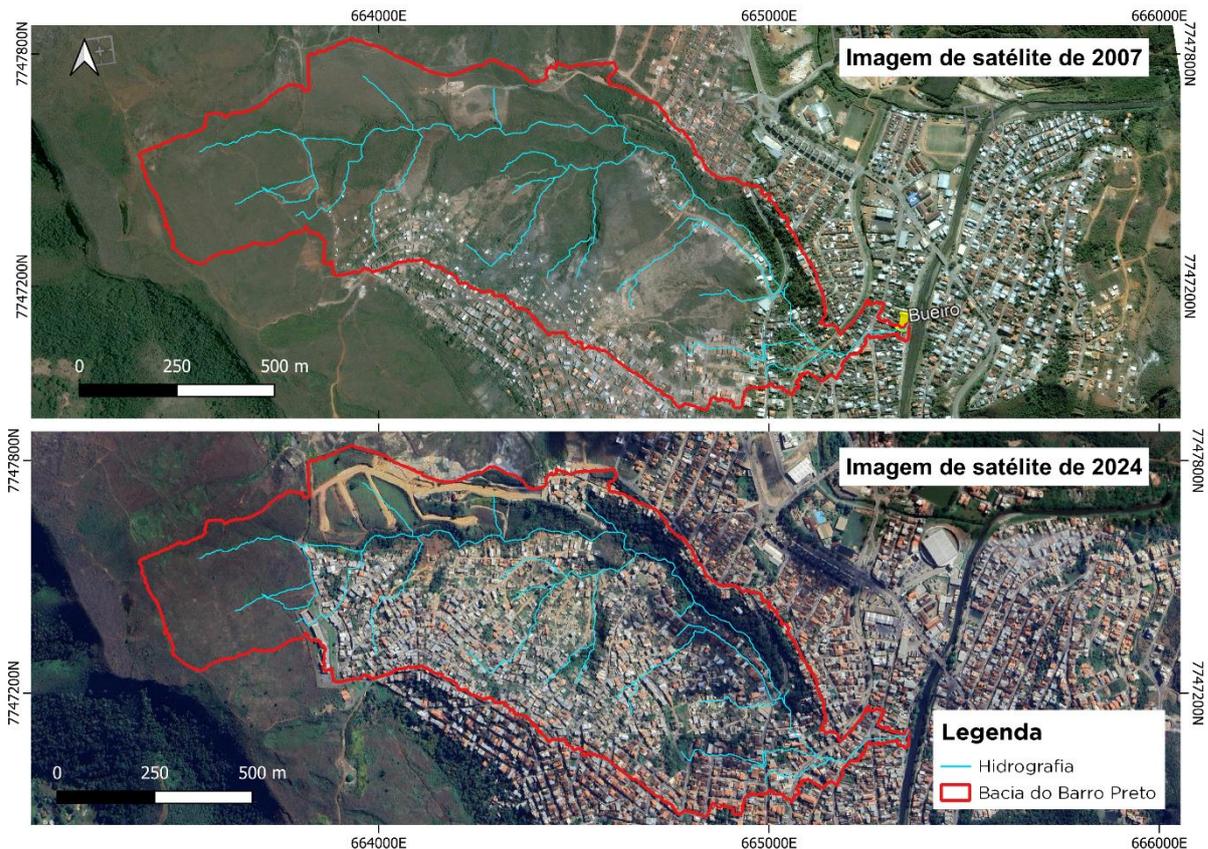


Figura 6 - Evolução da mancha urbana ao longo dos anos

Segundo informações do CLIMATE DATA (2023), o clima da região é quente temperado (Cwa), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média de 19,7°C e a pluviosidade média anual da região em torno de 1804 mm. Há maior pluviosidade no verão do que no inverno, sendo o período chuvoso compreendido entre os meses de dezembro a março.

A partir de uma caracterização geológica-geotécnica feita por Souza (2004) *apud* Sobreira (2000), as unidades geológico-geotécnicas predominantes na cidade são: Xisto Nova Lima, Formação Cauê, Formação Cercadinho, Formação Barreiro, Grupo Sabará, Depósitos Coluvionares e Depósito de Talus.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA

O relevo da sub-bacia de estudo é predominantemente Forte Ondulado, com declividade variando entre 20 e 45% (Figura 7), conforme a classificação criada pela EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. O relevo acentuado impacta diretamente na velocidade de escoamento superficial. O ponto mais elevado da bacia está na cota de 940 metros e o ponto mais baixo da bacia está na cota de 693 metros. Para a determinação dos parâmetros morfométricos, delimitou-se a bacia pelo exutório que desemboca no Ribeirão do Carmo

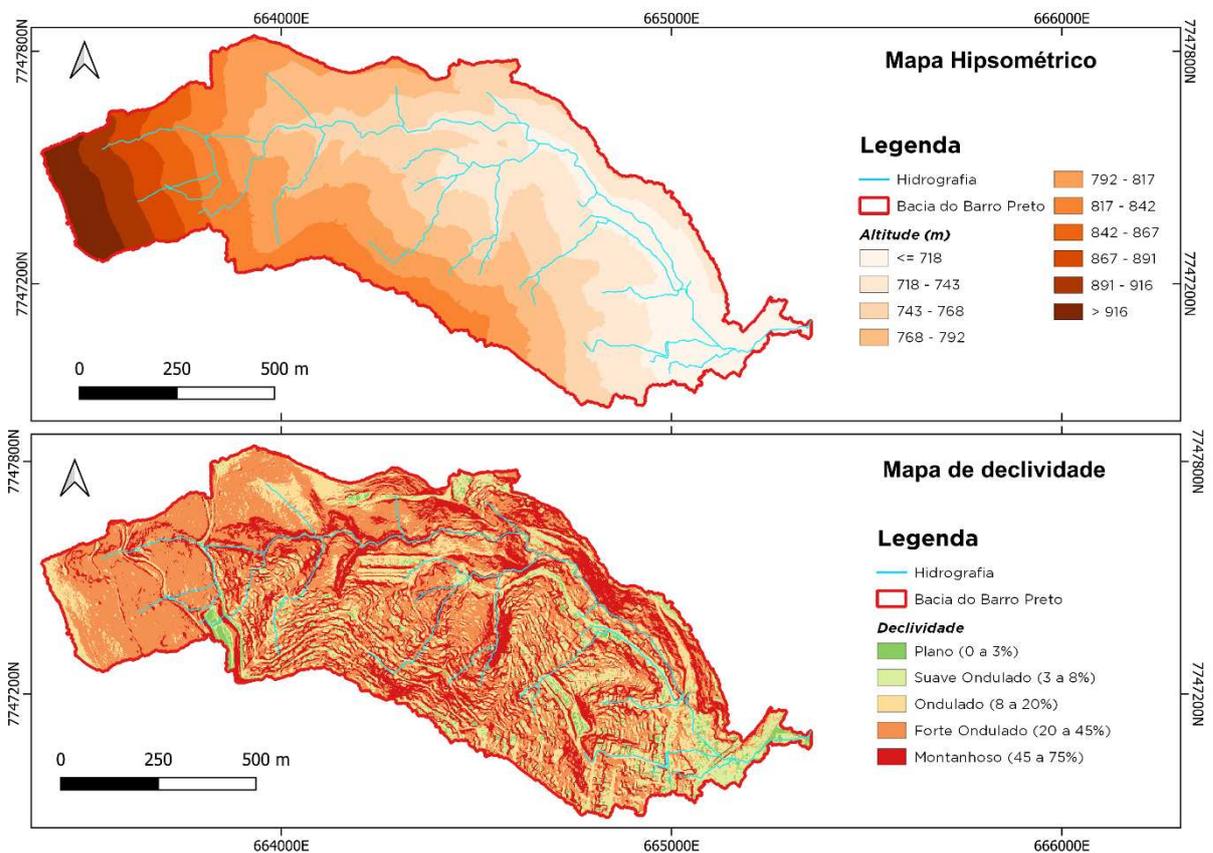


Figura 7 – Mapa hipsométrico e de declividade da bacia do Barro Preto

Os parâmetros morfométricos da sub-bacia do Barro Preto foram obtidos com o auxílio de ferramentas de SIG. Assim, o Quadro 2 apresenta os parâmetros

analisados neste estudo e os métodos para obtenção, em concordância com a revisão de literatura apresentada no item 2.1.

Quadro 2 - Parâmetros morfométricos analisados no estudo

Parâmetro	Método
Área de drenagem	Geoprocessamento
Perímetro da bacia	Geoprocessamento
Comprimento do curso d'água principal	Geoprocessamento
Comprimento total de todos os cursos d'água	Geoprocessamento
Coefficiente de compacidade	Equação de VILLELA; MATTOS (1975)
Coefficiente de forma	Equação de VILLELA; MATTOS (1975)
Densidade de drenagem	Equação de VILLELA; MATTOS (1975)
Ordem dos cursos d'água	Equação de VILLELA; MATTOS (1975) <i>apud</i> Horton (1945) e Strahler (1964)
Declividade equivalente do curso d'água principal	Equação de VILLELA; MATTOS (1975)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 MODELAGEM DOS FENÔMENOS HIDROLÓGICOS – CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

3.3.1 Caracterização do modelo hidrológico semi-distribuído e delimitação das sub-bacias

A modelagem matemática hidrológica foi realizada pelo modelo computacional HEC-HMS na versão 4.11. A escolha deste *software* foi fundamentada pela vasta aplicabilidade de simulações da transformação chuva-vazão e a propagação de cheias em rios e canais. Além disso, é um *software* de domínio público, com interface intuitiva e é um modelo amplamente utilizado por pesquisadores na área de recursos hídricos.

Inicialmente, foi necessário delimitar as sub-bacias para a modelagem hidrológica. Para a delimitação, foi utilizado o levantamento de *LaserScanner* com resolução espacial de 1 metro, fornecido pela Prefeitura de Mariana e realizado em

2021 como um dos produtos da Revisão do Plano Diretor. Com base nesse levantamento topográfico, foi gerado um arquivo matricial do terreno (MDT) para executar ferramentas de delimitação automatizadas no QGIS.

A delimitação das áreas de drenagem foi efetuada com o auxílio de ferramentas automatizadas, com ajustes manuais. Foram utilizadas duas ferramentas do QGIS: GRASS (*r.watershed* e *r.water.outlet*) e SAGA GIS (*Fill sinks (wang & liu)*, *Channel Network and Drainage Basins*, etc). Tais ferramentas possibilitaram traçar caminhos preferenciais de escoamento com base em um arquivo matricial, auxiliando na delimitação precisa das bacias de contribuição. Ainda assim, foi necessário realizar operações vetoriais de geoprocessamento para obter o conjunto completo de 11 sub-bacias (Figura 8). A Tabela 1 apresenta as áreas de drenagem geradas para as sub-bacias.

Assim, foi elaborado um modelo hidrológico semi-distribuído, para se ter um melhor controle dos parâmetros e trazer resultados mais próximos da realidade. A primeira etapa da modelagem hidrológica no HEC-HMS foi a construção de um modelo topológico com a indicação das sub-bacias, nós, condutos, junções e exutório. A transformação da chuva efetiva em vazão superficial foi realizada pelo método do hidrograma unitário do SCS e determinado o CN da sub-bacia com base no tipo, uso e cobertura do solo correspondentes aos cenários que serão propostos. Em termos de abreviações, as sub-bacias são representadas por “sb”, as junções por “j” e os trechos de rios por “*reach*” (Figura 9).

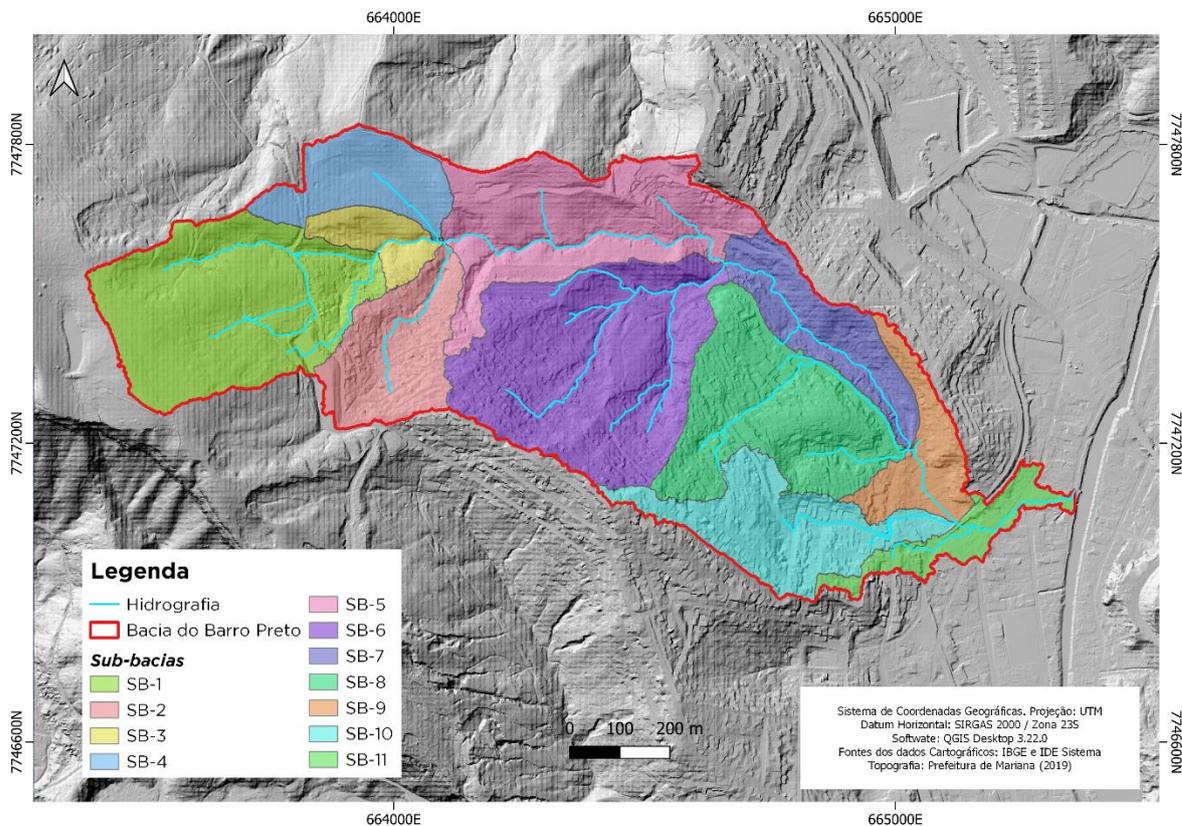


Figura 8 – Sub-bacias do Barro Preto

Tabela 1 - Áreas de drenagem das sub-bacias do Barro Preto

Sub-bacias	Área de drenagem (km ²)
SB-1	0,156
SB-2	0,065
SB-3	0,023
SB-4	0,051
SB-5	0,127
SB-6	0,178
SB-7	0,056
SB-8	0,116
SB-9	0,040
SB-10	0,080
SB-11	0,032
Total	0,924

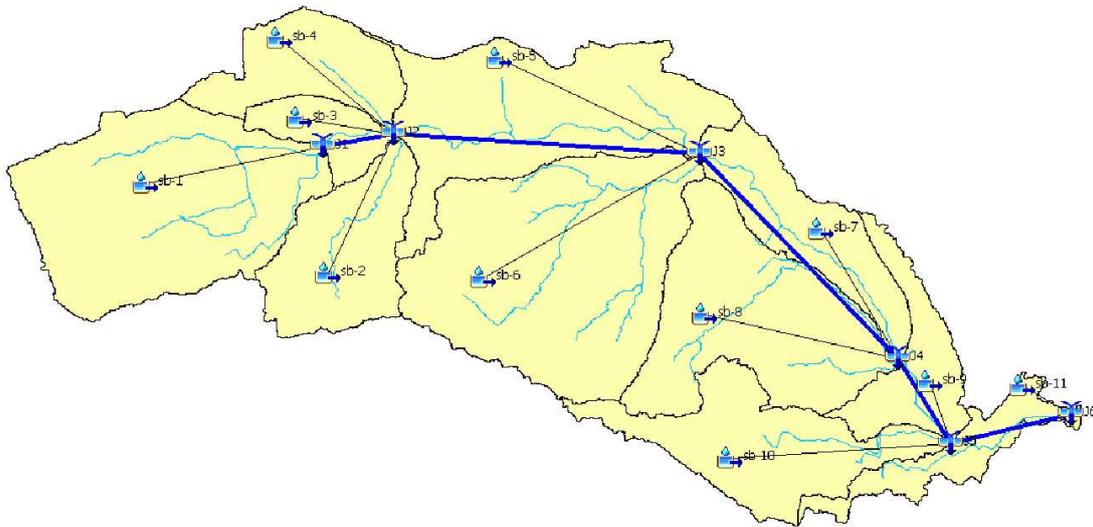


Figura 9 – Modelo topológico das simulações hidrológicas

3.3.2 Construção dos cenários de modelagem hidrológica

Foram propostos dois cenários que visam contemplar as diferentes configurações de uso e ocupação do solo em um intervalo de 17 anos, prevendo as vazões de pico geradas em cada cenário. Para tal, foram utilizadas imagens aéreas da bacia, por meio de imagens de satélites e ortofotos disponibilizadas pelo município.

Sendo assim, são definidos na sequência os cenários propostos:

- “Cenário de 2007”: Situação antiga da sub-bacia, correspondente ao ano de 2007, onde não havia as ocupações do bairro Novo Horizonte e demais áreas que estão atualmente ocupadas. Além de que, para este período, o imageamento via satélite estava com uma boa resolução;
- “Cenário de 2024”: Situação recente, correspondente ao ano de 2024, considerando a condição atual da bacia em termos de uso e ocupação do solo.

Ressalta-se que em ambos os cenários foram consideradas as mesmas 11 sub-bacias, tendo em vista que a morfologia da bacia não sofreu mudanças muito drásticas. Assim, para a simulação dos cenários propostos, a delimitação do uso e ocupação do solo foi realizada de forma manual, por meio do QGIS. A Figura 10 apresenta a evolução entre os cenários propostos.

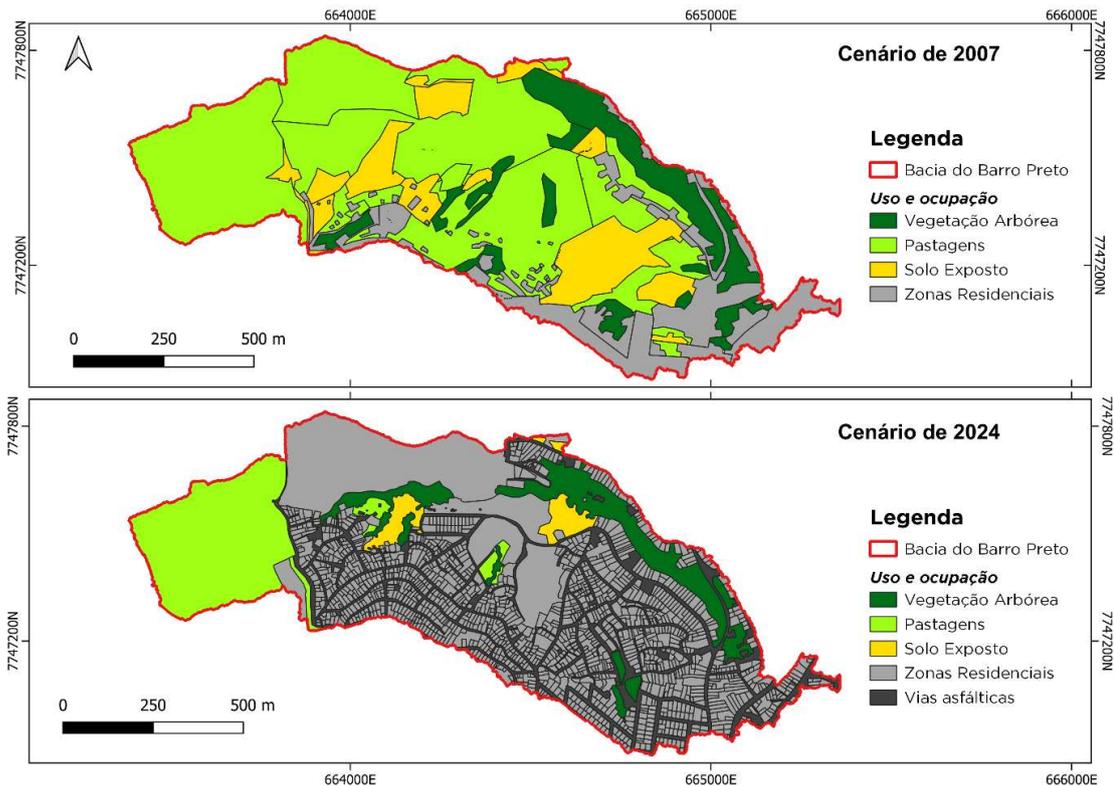


Figura 10 - Mapa de uso e ocupação do solo de cada cenário.

A bacia do Barro Preto está sobre a Província Geotectônica São Francisco e sob o Domínio dos Grupos Piracicaba, Itabira e Sabará, nos quais predominam rochas metamórficas e sedimentares. O tipo de solo predominante na bacia é classificado como Cambissolo, sendo que essa classe se comporta como solos fortemente a imperfeitamente drenados. Destaca-se que as características desta classe variam muito de um local para outro, devido à heterogeneidade do material de origem (EMBRAPA, 2018).

Como referência do tipo de solo da bacia em estudo, foi utilizada a definição desenvolvida pela FEAM/UFV (2010), presente na base de dados do IDE Sisema, onde há a presença de dois tipos de solo: o CXbd28 (presente em quase toda a totalidade da bacia) e o CXbd29. Ambos os tipos são classificados como Cambissolo Háplico e precisam então ser correlacionados com um Grupo Hidrológico do Solo (GHS), tendo sido utilizada como referência para o presente estudo a classificação sugerida por Sartori (2010). A Figura 11 apresenta os tipos do solo da bacia de estudo, seguindo a palheta de cores PANTONE, elaborada pela EMBRAPA em parceria com o IBGE.

Conforme a predominância do solo CXbd28 em quase toda a bacia, foi considerado este solo na ponderação do GHS. O solo CXbd28 é composto por 60% de um Cambissolo Háplico Tb distrófico, classificado como GHS B, cerca de 20% composto por Neossolo Litólico Tb Eutrófico típico, classificado como GHS D, 10% composto por Latossolo Vermelho Amarelo, classificado como GHS B, e outros 10% compostos por Afloramento de rocha, o qual também pode ser classificado como GHS D.

Para a definição do CN, foram considerados os valores para as áreas urbanas e suburbanas de Tucci (1993). O CN médio de cada sub-bacia, em cada cenário, foi ponderado pela área da tipologia do uso com seu respectivo CN ponderado ou adotado daquele uso. Ainda, para as áreas antropizadas como as zonas residenciais, loteamentos e vias asfálticas foram adotados os valores correspondentes ao GHS C, sendo este o grupo hidrológico do Cambissolo Háplico. Para as áreas naturais, foi feita uma média ponderada pela composição do solo de cada GHS estratificado do solo CXbd28, conforme a metodologia de Sartori (2010). Os valores adotados e ponderados estão contidos na Tabela 2.

Após o estabelecimento dos usos de cada cenário, realizou-se o cálculo do CN médio ponderado e o percentual de área impermeável de cada sub-bacia. Tais

parâmetros são dados de entrada do modelo hidrológico e são apresentados na Tabela 3.

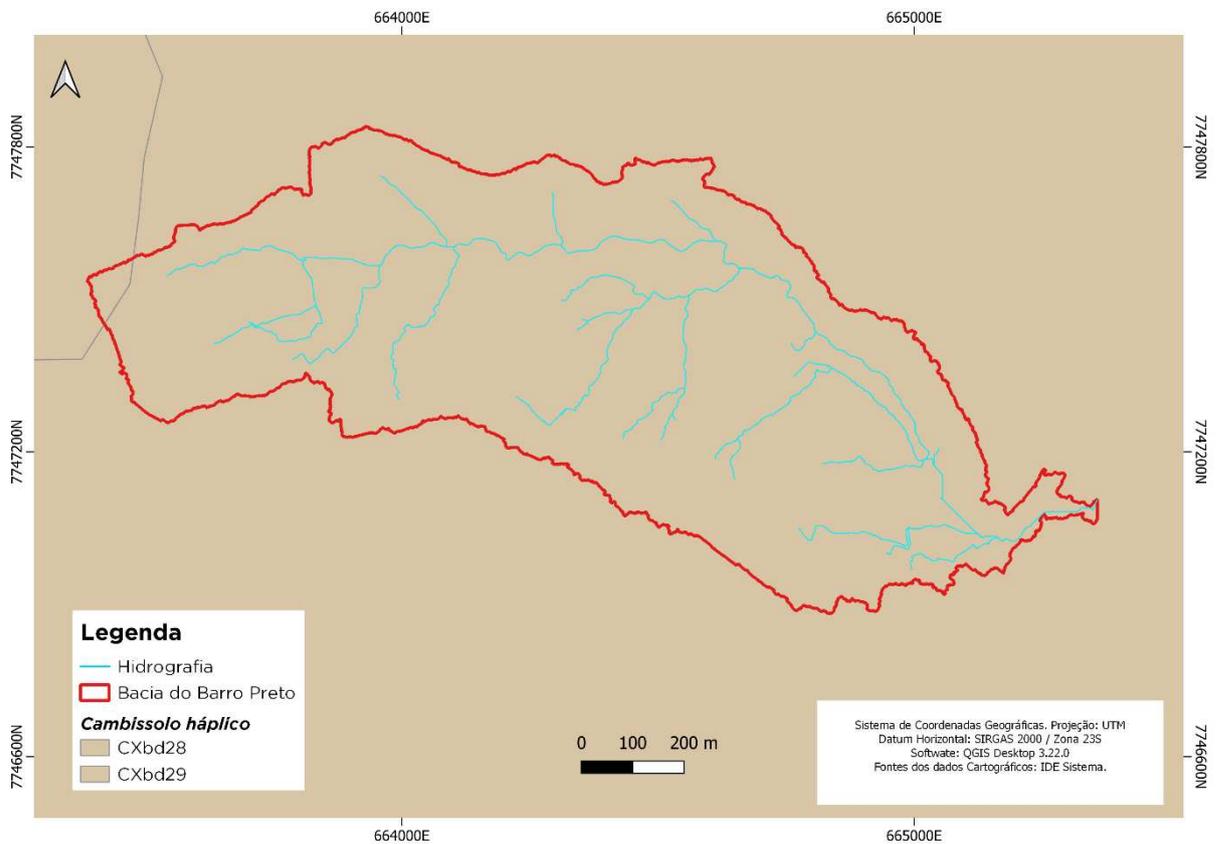


Figura 11 - Mapa de solos da bacia do Barro Preto

Tabela 2 - Valores de CN adotados para cada tipologia de uso e ocupação do solo

Tipologia (Uso e Ocupação)	CN Adotado/ponderado	Referência Bibliográfica / Método
Pastagens	82,0	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Solo exposto	84,1	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Vegetação arbórea	61,6	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Vias asfálticas	98,0	Tucci (1993)
Zonas residenciais / loteamento	90,0	Tucci (1993)

Tabela 3 - Resumo do CN ponderado calculado para cada sub-bacia

Sub-bacias	Cenário de 2007		Cenário de 2024	
	CN Ponderado	Percentual da Área impermeável	CN Ponderado	Percentual da Área impermeável
SB-1	82,08	0,20%	83,48	17,66%
SB-2	82,76	19,10%	89,44	82,68%
SB-3	82,00	0,00%	85,25	74,92%
SB-4	82,00	0,00%	88,81	85,77%
SB-5	79,07	1,13%	83,83	72,75%
SB-6	80,37	9,52%	89,68	92,07%
SB-7	71,71	18,45%	74,34	48,34%
SB-8	83,45	10,94%	91,40	99,51%
SB-9	78,12	57,68%	86,03	82,37%
SB-10	85,12	65,86%	89,32	93,02%
SB-11	88,48	94,39%	92,89	99,99%

3.3.3 Tempo de Concentração

O tempo de concentração foi calculado pela Equação Empírica de Kirpich (Equação 1), que segundo Silveira (2005) é comumente utilizada na prática da engenharia para bacias urbanas. O HEC-HMS utiliza como parâmetro de entrada o tempo de retardo (Equação 2), que pode ser representado como uma parcela do tempo de concentração, conforme as recomendações do SCS.

$$t_c = 0,0195 * S_e^{-0,385} * L^{0,77} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, t_c é o tempo de concentração (min), L o comprimento axial (m) e S_e a declividade média em m/m.

$$Lag = 0,60 * t_c \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, Lag é o $LagTime$ – tempo de retardo (min) e t_c é o tempo de concentração (min).

Assim, calculou-se os tempos de retardo pelo tempo de concentração para cada sub-bacia e trechos de rio (Tabela 4). Para a propagação de cheias nos trechos de rios (*reach*) foi utilizado o método *Lag*, seguindo a mesma lógica de ser composto por uma parcela do tempo de concentração. Os perfis longitudinais dos rios principais de cada sub-bacia e de cada rio de propagação de cheias foram incorporados no Apêndice A.

Conforme recomendado por Pinheiro (2011), para os tempos de concentração inferiores a 5 minutos, foi adotado o valor mínimo de 5 minutos, devido à precisão dos aparelhos que fornecem dados para as relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF), associados às chuvas de projeto.

Tabela 4 - Parâmetros calculados para as sub-bacias, incluindo o tempo de concentração e *LagTime*

Sub-bacias /Tremos de rio	Comprimento do rio principal (m)	Declividade equivalente do rio principal (m/m)	Tempo de concentração (min)	<i>LagTime</i> (min)
SB-1	594,345	0,1873	5,08	3,05
SB-2	425,759	0,1367	5,00	3,00
SB-3	143,882	0,0776	5,00	3,00
SB-4	201,220	0,2086	5,00	3,00
SB-5	721,583	0,0612	9,08	5,45
SB-6	694,063	0,1449	6,32	3,79
SB-7	621,938	0,0235	11,71	7,03
SB-8	662,566	0,0982	7,09	4,25
SB-9	204,986	0,0083	7,44	4,46
SB-10	453,200	0,0990	5,27	3,16
SB-11	495,215	0,0220	10,08	6,05
Reach-0	143,882	0,0776	5,00	3,00
Reach-1	721,583	0,0612	9,08	5,45
Reach-2	621,938	0,0235	11,71	7,03
Reach-3	204,986	0,0083	7,44	4,46
Reach-4	285,220	0,0071	10,20	6,12

3.3.4 Chuvas de projeto

Para os cenários de 2007 e 2024, as precipitações de projeto foram obtidas por meio da Equação IDF representativa para o município de Mariana, resultante de uma interpolação que utilizou o Método do Inverso da Quinta Potência de localidades conhecidas, fornecida pelo *software* Plúvio versão 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

O Tempo de Retorno (TR), ou período de retorno, pode ser definido como “o inverso da probabilidade de um determinado evento hidrológico ser igualado ou excedido em um ano qualquer” (TUCCI, 2001). O TR está relacionado ao risco que uma população está sujeita, sendo cada tipo de obra há um risco aceitável a ser adotado em projetos de drenagem urbana. Ou seja, para uma obra projetada para um TR, há uma probabilidade de 1/TR dessa obra falhar todo ano (TUCCI, 2001). Existem valores diferentes de TR para cada tipo de obra na literatura, manuais técnicos e legislações.

Diante disso, foi testado o intervalo de 10 a 50 anos como TR, considerando a recomendação de 25 anos como tempo de retorno em projetos de macrodrenagem (BRASIL, 2020). A equação IDF é representada pela equação 3.

$$i = \frac{838,136 \cdot T_r^{0,188}}{(t + 9,632)^{0,710}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, i = intensidade máxima de chuva (mm/h), T_r = Tempo de retorno (anos) e t = duração da chuva (minutos).

Após a inserção de todos os parâmetros, primeiramente simulou-se as chuvas com os TR de 10, 25 e 50 anos e durações de 30, 60, 90 e 120 minutos, a fim de descobrir a duração crítica da chuva para a bacia (Tabela 5). A discretização das

precipitações foi realizada pelos quartis de HUFF (1967). Como premissa, foi adotado o primeiro quartil com 50% probabilidade de excedência, que é recomendado por HUFF (1967) para precipitações com duração inferior a 6 horas. As precipitações foram discretizadas com intervalo de tempo de 1 minuto (Apêndice B).

A partir disso, simulou-se todas as chuvas em diferentes durações para verificar as durações que representaram uma maior vazão de pico, em cada tempo de retorno, para a definição da duração crítica.

Tabela 5 - Quantis de Chuva para diferentes durações e Tempos de Retorno para Mariana - MG

Duração	Tempo de Retorno (TR) – Quantis (mm)		
	10	25	50
30 min	47,39	56,30	64,13
60 min	63,52	75,46	85,97
90 min	73,88	87,77	99,99
120 min	81,72	97,08	110,59

O exutório para a área de estudo foi considerado na junção “J5”, onde há o conhecimento da geometria do canal aberto (Trecho 4) e onde há o estrangulamento (emboque no Trecho 5). A Figura 12 apresenta em vermelho o ponto de extração dos resultados.

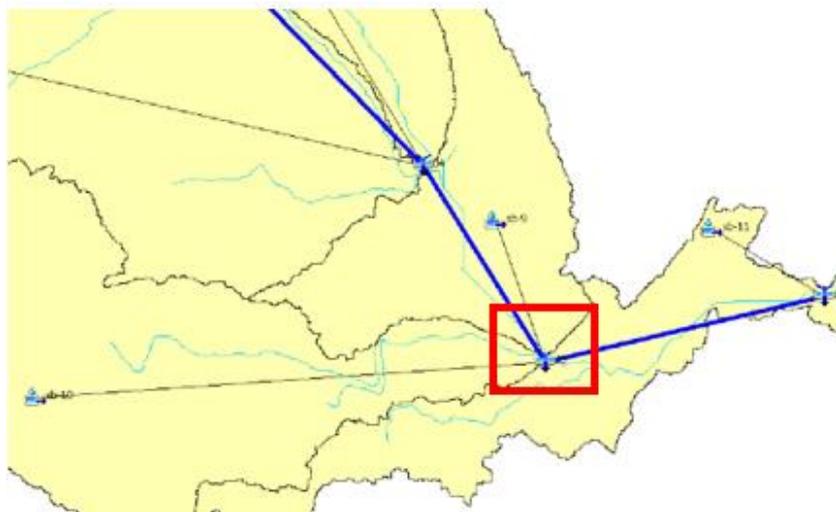


Figura 12 - Exultório da área de estudo

3.4 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DAS ESTRUTURAS DE MACRODRENAGEM

No ano de 2023, um evento de inundação ocorreu no bairro Barro Preto na Travessa Monsenhor Rafael Coelho – Trecho 2 (Figura 13). Segundo informações da Defesa Civil De Mariana (2023), a travessa se encontra em cima de um canal revestido com concreto e a lâmina de água atingiu 1,5 metros. O evento ocorreu no dia 12 de fevereiro de 2023, no período da tarde, com uma chuva de 63,9 mm, correspondente à duração de 60 minutos. Cerca de 40 famílias foram atingidas pelo evento e a prefeitura efetuou um pagamento de R\$ 10 mil reais de indenização por família.

Contudo, além da população atingida no Trecho 2 (Travessa), a população à jusante (Trecho 4) também foi afetada (Figura 14). Para o mesmo evento, no trecho a jusante do registrado pela Defesa Civil, foi registrada uma lâmina de água de aproximadamente 80 centímetros acima do canal pelas marcas deixadas nas paredes, medidas *in loco*. Para se ter um melhor entendimento dos trechos na bacia do Barro Preto, a Figura 15 apresenta essa dinâmica e variação, com um zoom na parte crítica da bacia a jusante.



Figura 13 - Inundação na Travessa Monsenhor Rafael Coelho (Trecho 2)

Foto: Redes sociais (fevereiro/2023).



Figura 14 - Inundação do Trecho 4 a jusante do bueiro

Foto: Redes sociais (fevereiro/2023).

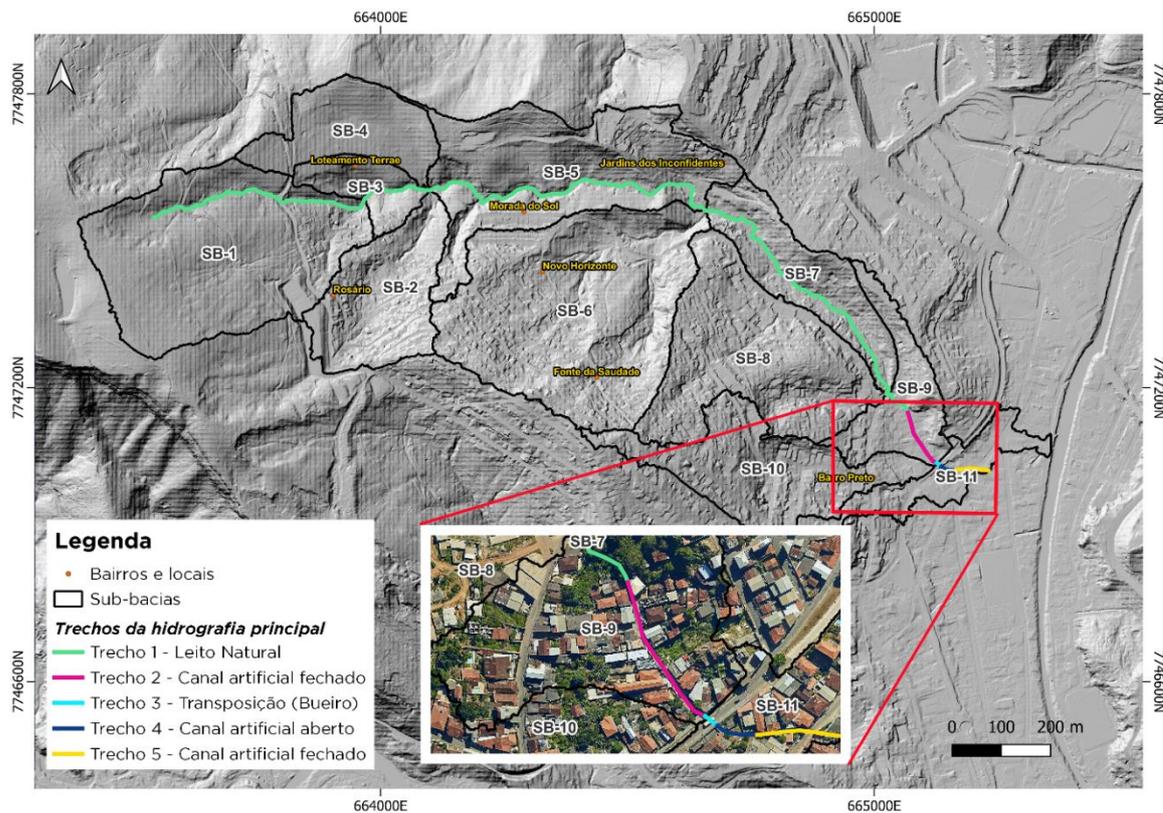


Figura 15 - Mapa de localização dos trechos do talvegue principal

Em visitas de campo, foi realizada a medição da geometria do canal do Trecho 4 (Tabela 6) e do emboque do Trecho 5 (Figura 16). Não há como ter certeza se a geometria do Trecho 5 varia ao longo do trajeto, sendo difícil avaliar a capacidade mediante a tais incertezas. Quanto ao Trecho 5, entende-se que a largura do emboque continuou a mesma do Trecho 4, mas a altura do canal de concreto reduziu para aproximadamente 1 metro em termos de geometria da seção.

Tabela 6 - Parâmetros dos Trechos 4 e 5

Largura (m)	Profundidade (m)	Coefficiente de Manning	Declividade média (m/m)	Forma	Trecho
3,00	1,30	0,015	0,0206	Retangular	4
3,00	1,00	0,015	-	Retangular	Emboque do Trecho 5



Figura 16 - Canal aberto (Trecho 4) com emboque do canal fechado (Trecho 5)

Foto: Registrado pelo autor (abril/2024)

Em vários trechos há uma grande quantidade de assoreamento composto por solo carreado, efluentes domésticos lançados, troncos de árvore, galhos, folhas, resíduos sólidos e pedregulhos, além de outros tipos de objetos lançados pela população marginal a montante. A Figura 17 mostra o nível de assoreamento do Trecho 4 em 2024.



Figura 17 - Canal assoreado do Trecho 4 com bueiro ao fundo (Trecho 3)

Foto: Registrado pelo autor (abril/2024)

Não foi possível também avaliar a capacidade hidráulica do Trecho 2 (Travessa) e Trecho 3 (Bueiro), devido ao desconhecimento da geometria do canal revestido e da singularidade, e pela dificuldade de acesso para medições em campo. Apesar do Trecho 4 ter dimensões conhecidas na medição *in loco* de 2024, não se tem o conhecimento se a altura do canal era a mesma em 2023 quando tal Trecho era revestido.

À luz do exposto, para avaliar a capacidade hidráulica das estruturas de macrodrenagem da bacia em estudo, foi analisada a capacidade do Trecho 4, porém

considerando a seção geométrica do emboque do Trecho 5, pois tal Trecho é a seção de controle devido ao estrangulamento geométrico.

Aplicando a Equação IDF (Equação 3) para o evento de fevereiro de 2023, pode-se dizer que a chuva que atingiu a bacia naquele evento corresponde a um TR de 10 anos. Sendo assim, foi comparada a vazão de pico referente a cada cenário para o evento de inundação de 2023 (TR de 10 anos), considerando a seção crítica do Trecho 5 e a duração real do evento de 1 hora. Na sequência, foi verificada a capacidade hidráulica do canal considerando o TR de 25 anos e a duração crítica, conforme recomendação técnica para projetos de canais de macrodrenagem, que adotam um TR de 25 anos (BRASIL, 2020).

Assim, com o suporte do *software* SisCCoH versão 1.1, verificou-se a capacidade hidráulica dos trechos em análise, considerando-o como canal, em escoamento livre, de seção regular e uniforme. Conforme especificado no manual técnico do *software* (ALEXANDRE; BAPTISTA; MARINHO, 2019), é possível selecionar uma das variáveis a serem calculadas como a profundidade de fluxo, rugosidade de Manning, a vazão ou a declividade. A vazão é calculada pela equação de Manning (Equação 4), a profundidade se dá pela razão da área molhada e largura superior, a velocidade é por meio da Equação da continuidade (Equação 5) e o número de Froude (Equação 6).

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I} \quad (\text{Equação 4})$$

$$Q = U \cdot A \quad (\text{Equação 5})$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot A}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

U: velocidade (m/s); Q: a vazão (m³/s); Rh: Raio hidráulico (m); I: Declividade de fundo média (m/m); A: área da seção (m); Fr: número de Froude; g: aceleração da gravidade (m/s²)

O número de Froude divide o escoamento em 3 tipos de regime:

- **Fr < 1**: Escoamento subcrítico (ou fluvial)
- **Fr = 1**: Escoamento crítico
- **Fr > 1**: Escoamento supercrítico (ou torrencial)

3.5 AVALIAÇÃO DO PLANO DIRETOR QUANTO À DRENAGEM URBANA

A gestão da drenagem urbana é um componente essencial do planejamento urbano sustentável. Nessa ótica, as legislações e políticas públicas desempenham um papel crucial para garantir que os novos projetos sejam sustentáveis e não agravem os problemas de drenagem urbana. Assim, a drenagem urbana eficaz não só reduz os riscos de inundações, mas também contribui para a saúde pública, a preservação ambiental e a qualidade de vida nas cidades (TUCCI, 2005b). Um escopo normativo bem consolidado e fiscalização eficiente são essenciais para orientar o desenvolvimento urbano de forma a mitigar os impactos das inundações, proteger a infraestrutura e garantir a segurança das populações.

Mediante aos recorrentes eventos de inundação e à ineficiência do sistema de drenagem da cidade, novos empreendimentos precisam avaliar esse impacto hidrológico nas bacias existentes. No entanto, tal avaliação pode não estar sendo considerada, o que pode potencializar o aumento das velocidades de escoamento superficial de uma determinada bacia. Tucci (2005b) aborda essa necessidade de regulamentar a aprovação de novos empreendimentos com base em estudos hidrológicos e hidráulicos detalhados e enfatiza a importância da manutenção contínua para garantir o desempenho eficaz dos sistemas de drenagem.

Para avaliar os instrumentos municipais que abordam diretrizes quanto à drenagem das águas pluviais, foram analisados os aspectos abordados no Plano Diretor de Mariana revisado, instituído pela Lei Complementar nº 228, de 22 de dezembro de 2022 (PMM, 2022), verificando se ele atende às necessidades de mitigação de riscos hídricos e à sustentabilidade. Além disso, foram contemplados os critérios estabelecidos pelo município para a aprovação de novos empreendimentos e se há alguma limitação na aprovação mediante aos estudos hidrológicos e hidráulicos, se exigidos.

3.6 PROPOSIÇÕES DE MELHORIA DA QUALIDADE E CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CÓRREGO

O controle de inundações pode ter medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais ocorrem quando o ser humano modifica o curso d'água, seja por meio de obras hidráulicas como canalizações e diques, por exemplo. Já as medidas não estruturais ocorrem quando o ser humano convive com o curso d'água, sendo as principais delas: zoneamento de áreas de risco de inundação, sistemas de alerta ligados a defesa civil, dentre outros. O zoneamento de tais áreas pode ser incorporado no Plano Diretor municipal ou por alguma outra legislação municipal específica (TUCCI *et. al.*, 1995).

Dentre os princípios do controle de inundações para ser ter um programa consistente de drenagem urbana, detalhadas por Tucci *et. al.* (1995), destacam-se:

- A bacia hidrográfica tratada como um sistema, sendo que os impactos não devem ser transferidos para jusante. Caso ocorra, é necessário prever medidas mitigadoras;
- Medidas de controle de forma conjunta na bacia, sejam elas medidas estruturais e não estruturais;

- Meios de implantação do controle de enchentes como o Plano Diretor, legislações municipais e estaduais, e manuais de drenagem;
- Prever o horizonte de expansão no planejamento de áreas a serem desenvolvidas no futuro, verificando esse impacto na bacia como um todo;
- Cada usuário urbano não deve ampliar a cheia natural;
- Controle de enchentes como processo permanente;
- A educação de profissionais, da população e dos administradores públicos é essencial;
- A administração eficiente para verificar os impactos em projetos de loteamentos, obras públicas e drenagens;
- Atualização de normas brasileiras sobre drenagem urbana;

Nesse sentido, a partir de todos os resultados obtidos e análises realizadas no presente estudo, foram abordadas medidas estruturais e não estruturais para mitigar os impactos de inundações na bacia do Barro Preto com base nos princípios de controle de inundação de Tucci *et. al.* (1995). Para isso, exemplos de outros municípios integraram as proposições respaldadas em cases de sucessos e políticas públicas viáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

A partir da consolidação de dados da bacia, foram calculados os parâmetros morfométricos para verificar sua propensão natural a grandes inundações. Os parâmetros podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Síntese dos parâmetros morfométricos

Parâmetro	Valor
Área de drenagem (km ²)	0,924
Perímetro da bacia (km)	7,949
Comprimento do curso d'água principal (km)	2,490
Comprimento total de todos os cursos d'água (km)	7,914
Coefficiente de compacidade	2,315
Coefficiente de forma	0,149
Densidade de drenagem (km/km ²)	8,565
Ordem dos cursos d'água	3
Declividade equivalente do curso d'água principal (m/m)	0,089

Analisando os parâmetros da Tabela 7, conforme Villela e Mattos (1975), pelo coeficiente de compacidade e de forma, a bacia não tem tendência a grandes inundações. Esta possui uma forma mais alongada e estreita, havendo menos possibilidade de ocorrência de chuvas extremas cobrindo toda sua extensão ao mesmo tempo. Pela densidade de drenagem, a bacia é excepcionalmente bem drenada.

Diante do exposto, a bacia do Barro Preto não tem uma propensão natural a grandes inundações, considerando a sua morfologia. Contudo, intervenções antrópicas no caminho natural do escoamento podem impactar diretamente nos eventos registrados na bacia. Assim, se torna necessário estabelecer o modelo hidrológico das dinâmicas de escoamento pelos parâmetros fisiográficos.

4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na Tabela 8 são apresentados os quantitativos de área referente a cada tipologia de uso e ocupação do solo, considerando os dois cenários propostos. Observa-se que as zonas residenciais aumentaram em mais de três vezes (aumento de 255%), tendo reduções significativas das áreas de pastagens (redução de 71,7%). Essa mudança influencia a dinâmica de escoamento das precipitações, impactando as estimativas de CN que alimentam o modelo (Tabela 3).

Tabela 8 - Quantitativos de áreas referente a cada tipologia de uso e ocupação

Tipologia (Uso e Ocupação)	Cenário de 2007		Cenário de 2024		Aumento/Redução Percentual
	Área m ²	Percentual	Área m ²	Percentual	
Pastagens	518.252,00	56,05%	146.662,20	15,86%	-71,70%
Solo exposto	135.352,00	14,64%	117.955,40	12,76%	-12,85%
Vegetação arbórea	111.010,00	12,01%	91.214,66	9,86%	-17,83%
Zonas residenciais	160.026,77	17,31%	568.808,51	61,52%	+255,45%

Após a inserção de todos os dados de entrada no modelo hidrológico, simulou-se todas as chuvas para as diferentes durações especificadas no item 3.3.4. Assim, os hidrogramas para a verificação da duração crítica, vazões de pico e volumes estão presentes no Apêndice C. Para o cenário de 2024, a duração crítica (duração que produziu a maior vazão de pico) para os TR de 10, 25 e 50 anos foi de uma hora (60 minutos). Já para o cenário de 2007, a duração crítica para os TR de 10, 25 e 50 anos foi de 1 hora e meia (90 minutos).

Considerando as durações críticas supracitadas, as vazões geradas em cada cenário são apresentadas na Tabela 9, os volumes na Tabela 10 e os hidrogramas de cada TR são apresentados na Figura 18, Figura 19 e Figura 20.

Tabela 9 - Resumo das vazões de pico em cada cenário

Cenário	Vazões de pico (m ³ /s)			Duração crítica
	TR 10	TR 25	TR 50	
2007	14,5	19,5	24,0	1,5 hora
2024	27,8	33,6	38,8	1 hora
Aumento Percentual	92%	72%	62%	-

Tabela 10 - Resumo dos volumes em cada cenário

Cenário	Volumes (m ³)			Duração crítica
	TR 10	TR 25	TR 50	
2007	33.700	43.800	53.000	1,5 hora
2024	48.100	58.200	67.100	1 hora
Aumento Percentual	43%	33%	27%	-

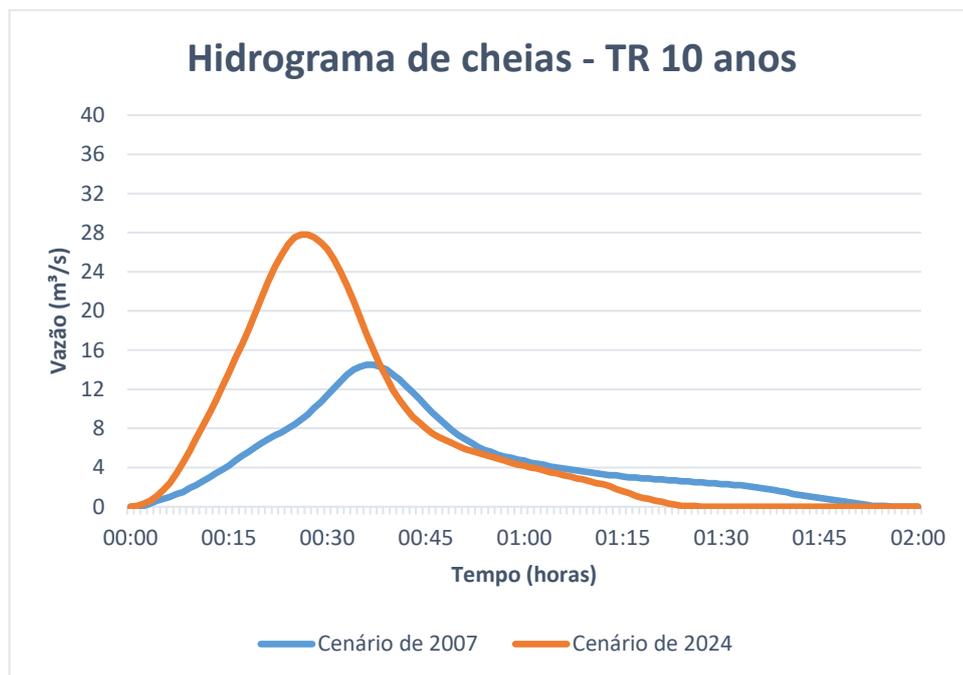


Figura 18 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 10 anos

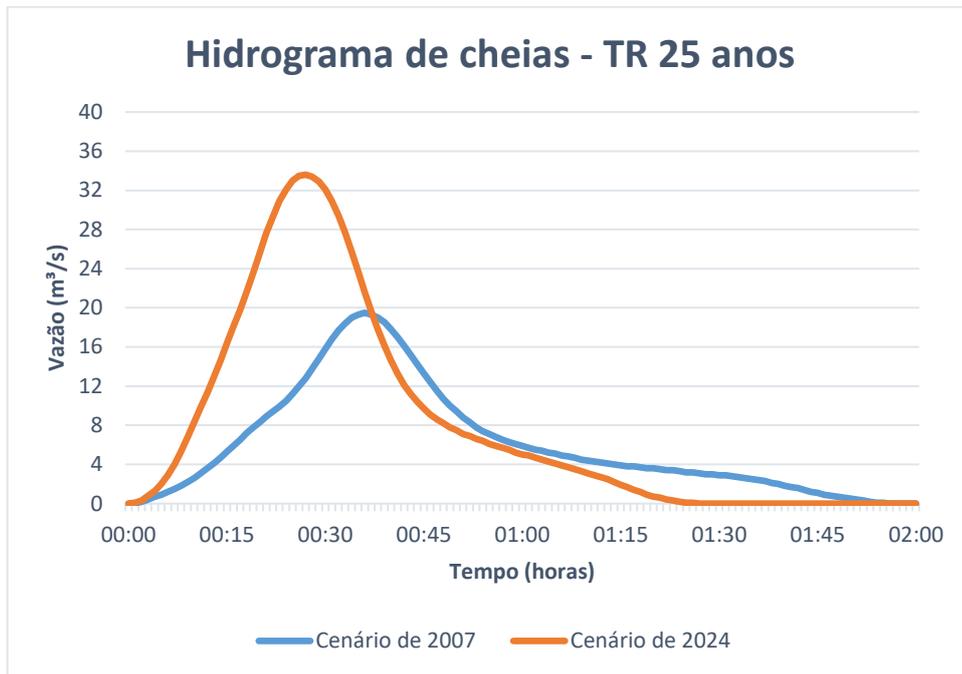


Figura 19 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 25 anos

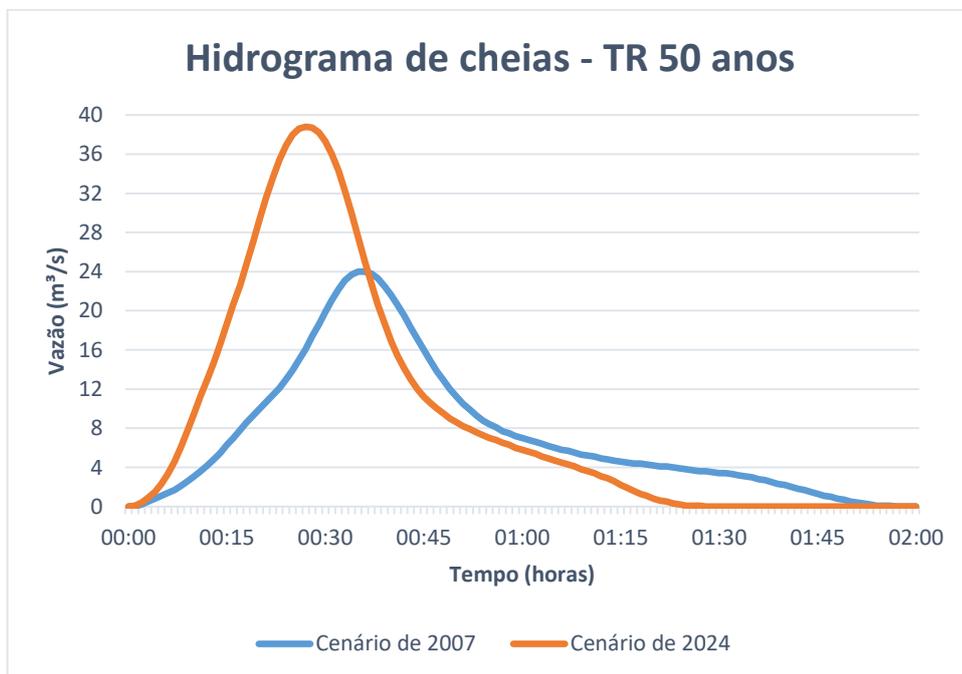


Figura 20 - Hidrograma de cheias referente ao TR de 50 anos

Comparando os hidrogramas dos cenários de 2007 e 2024, nota-se a similaridade com os hidrogramas hipotéticos para áreas urbanizadas e não urbanizadas de Tucci (2007). Neste caso, o cenário de 2007 comporta-se como uma área não urbanizada e o de 2024 como uma área urbanizada. Tal evolução em termos de uso e ocupação do solo resultou em uma vazão de pico para 2024 bastante superior à de 2007, variando em um aumento percentual de 62 a 92%, para os tempos de retorno de 50 e 10 anos, respectivamente. Em termos do tempo correspondente ao pico do hidrograma, nota-se uma redução que variou entre 33 e 42%.

Resultados semelhantes foram encontrados por Quinonez Fernandez (2019) para a bacia do córrego Matilde-cuê, no Paraná, considerando os cenários dos anos de 1950 e 2013. Neste estudo, o impacto nas vazões máximas teve um aumento de 103% para o TR de 2 anos e 66,8% para o TR de 20 anos.

Em relação aos volumes gerados, conforme observado na Tabela 10, percebe-se um aumento variando entre 14.100 e 14.400 m³ de 2007 a 2024, considerando as chuvas simuladas, o que representa um aumento de 43%, 33% e 27% para os TR de 10, 25 e 50 anos, respectivamente. Em termos de comparação, tal aumento representou um volume de aproximadamente 14.100 a 14.400 caixas d'água de 1.000 litros.

Observando os resultados obtidos para o cenário de 2024, é perceptível que o aumento da vazão de pico para o TR de 50 anos (62%) é inferior ao TR de 10 anos (92%). Isso se justifica pelo limite de absorção do solo em relação ao evento pluviométrico, ou seja, quando o solo já atingiu um limite de saturação, qualquer acréscimo além dessa capacidade de infiltração será transformado em escoamento superficial. Resultados similares foram obtidos em outros estudos, como o de Palla e Gnecco (2015), que para os TR de 2, 5 e 10 anos houve reduções nas vazões de pico de 45%, 37% e 31%, respectivamente, utilizando cenários de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development – LID*).

Diante disso, os principais impactos da urbanização, analisando os hidrogramas, foram: o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume de escoamento superficial. Em termos de inundações localizadas, Tucci (2007) enfatiza que tais fenômenos podem ser provocados por estrangulamento da seção de rios, remansos por conta da macrodrenagem, rio principal e lagos, ou por erros de execução de projetos de drenagem. Estes tipos de inundações podem ocorrer de forma isolada ou combinada.

Nesse sentido, o aumento da vazão de pico combinada com as variações geométricas e obstruções ao longo dos trechos na bacia de estudo podem ter provocado inundações localizadas em 2023. Para tal verificação, é necessário avaliar as especificidades da capacidade hidráulica de alguns trechos, de acordo com as vazões de pico simuladas no presente estudo.

4.3 ANÁLISE DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CANAL

Avaliando a capacidade hidráulica do canal para o evento de inundação de 2023, simulou-se as vazões de pico correspondentes à duração da chuva de 1 hora de cada cenário no *software* SisCCoH 1.1 (Tabela 11). Destaca-se a consideração da altura de 1 metro do canal do Trecho 4 para 2023, conforme detalhado no item 3.4.

Tabela 11 - Parâmetros hidráulicos do Trecho 4 para o evento de inundação (TR de 10 anos)

Parâmetros	Cenário de 2007	Cenário de 2024
Área molhada (m ²)	2,35	3,75
Número de Froude	2,22	2,12
Profundidade do fluxo (m)	0,76	1,25
Vazão (m ³ /s)	13,8	27,8
Velocidade (m/s)	6,06	7,41

Para o TR de 10 anos, o cenário de 2007 gera a vazão de 13,8 m³/s para a duração de 1 hora, resultando em uma borda livre de 24 centímetros. Já para o cenário

de 2024, o canal extravasaria, considerando a vazão de 27,8 m³/s e mesma duração, com uma lâmina d'água de 25 centímetros acima do canal. As velocidades em ambos os cenários estão bem elevadas, mas apenas o cenário de 2007 está próximo do limite máximo suportado pelo revestimento de concreto, de 6,00 m/s, conforme especificado por Chavez (2016).

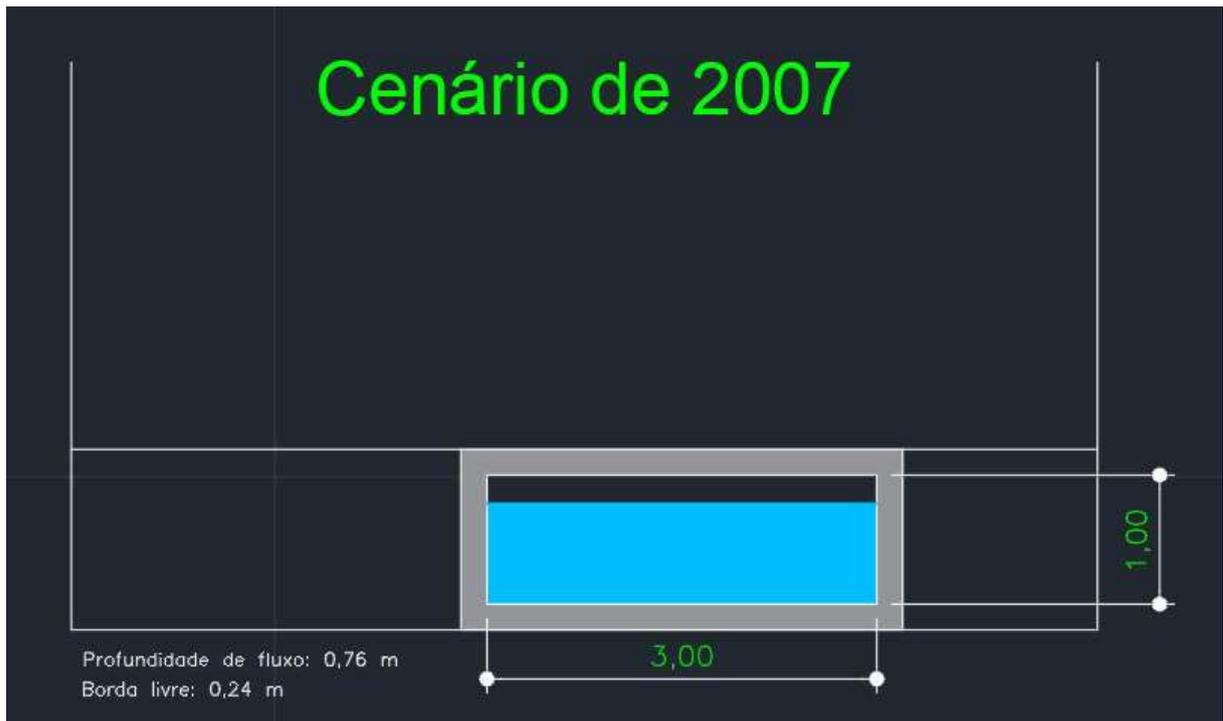


Figura 21 - Seção transversal do canal para o cenário de 2007



Figura 22 - Seção transversal do canal para o evento de fevereiro de 2023

O número de Froude resultante foi de 2,22 e 2,12 para os cenários de 2007 e 2024, respectivamente. Logo, como o número de Froude é maior que 1, o regime de escoamento é supercrítico em ambos os cenários considerados. Isso significa que a velocidade do fluxo é maior do que a velocidade das ondas de superfície. Tal regime de escoamento é menos estável e mais turbulento em comparação ao regime subcrítico.

A diferença da lâmina d'água encontrada no evento de inundação (25 centímetros) destoa dos 80 centímetros registrados em 2023 para o Trecho inundado (Figura 22), próximo aos Trechos 4 e 5. Entende-se que de 2023 a 2024 não teve mudanças significativas no uso do solo, justificando a comparação em anos diferentes. Assim, pode-se levantar algumas hipóteses dessa diferença:

- Não se tem conhecimento das profundidades reais em 2023, devido ao nível de assoreamento elevado e modificações na altura do canal com a retirada do revestimento;
- A transição do bueiro (Trecho 3) para o canal revestido (Trecho 4), em 2023, tinha uma abertura, o que poderia ter gerado turbulência pelo choque da onda da cheia na tampa do canal de concreto na época;
- A transição do Rio 2 e o Rio 3 teve uma mudança brusca na declividade média do rio, o que poderia ter gerado um ressalto hidráulico pela transição dos regimes de escoamento, potencializando a altura da lâmina d'água somado com a intensidade pluviométrica do evento;
- Em alguns dos trechos a montante, possivelmente na transição do Trecho 1 para o Trecho 2, pode ter acontecido alguma obstrução de um objeto grande, como um tronco de árvore ou algum outro objeto móvel, restringido o fluxo de escoamento e/ou causando uma sobre-elevação do nível de água, atingindo a população do Trecho 2;
- Ao longo dos trechos, há variações na geometria do canal, com alargamentos e estrangulamentos pontuais tanto em largura quanto em profundidade.

Essa primeira verificação hidráulica teve como objetivo validar o modelo hidrológico. Apesar da lâmina d'água não ter atingido a cota inundada no ano de 2023, o modelo foi capaz de validar que o canal não suportou o evento em si. Diante disso, pode-se verificar se o canal do Trecho 4 suporta a vazão de um TR de 25 anos, considerando a geometria medida em campo em 2024 (após a abertura do revestimento).

Considerando a avaliação para o cenário de 2024, quanto à recomendação técnica, a Tabela 12 apresenta os parâmetros hidráulicos calculados para uma condição atual. Assim, considerando a vazão de 33,6 m³/s para a duração crítica de 1 hora e meia, o canal do Trecho 4 não suporta a vazão para o TR de 25 anos, tendo

uma lâmina d'água excedente de 14 centímetros. A velocidade de 7,78 m/s está acima da recomendação de 6,00 m/s para o revestimento de concreto (CHAVEZ, 2016) e o número de Froude (2,02) indica que o regime de escoamento é supercrítico. Destaca-se que a altura do canal considerada para este caso foi de 1,30 metros, conforme detalhado no item 3.4. A Figura 23 apresenta a seção transversal do Trecho 4, com os resultados obtidos.



Figura 23 - Seção transversal do Trecho 4 em 2024, dimensões medidas *in loco*

Tabela 12 - Parâmetros hidráulicos do cenário de 2024 para TR de 25 anos

Parâmetros	Trecho 4
Área molhada (m ²)	4,32
Número de Froude	2,07
Profundidade do fluxo (m)	1,44
Vazão (m ³ /s)	33,6
Velocidade (m/s)	7,79

Vale ressaltar que tal verificação pontual não é a mais adequada. O ideal seria realizar um modelo hidráulico fluvial, com o cadastro de todas as seções e singularidades. Contudo, devido à falta desse cadastro das seções topobatimétricas e incertezas quanto à variação ao longo do canal, torna-se muito difícil elaborar e calibrar o modelo, e gerar a mancha de inundação no terreno para verificar a cota de inundação em diferentes pontos.

4.4 AVALIAÇÃO DO PLANO DIRETOR QUANTO À DRENAGEM URBANA

O Plano Diretor do município de Mariana – MG, instituído pela lei complementar nº 228 em 22 de dezembro de 2020 (PMM, 2022), traz em sua revisão algumas atualizações das diretrizes em diversos setores. O último Plano Diretor foi aprovado em 2004, sendo que foi necessário aguardar 18 anos para a revisão adequada deste instrumento normativo. Mediante a isso, foi realizada uma análise de tal instrumento, a fim de verificar a existência de diretrizes associadas à drenagem urbana, principalmente relacionadas a novos empreendimentos.

No Art. 9, onde são definidas macrodiretrizes referentes a aspectos ambientais e de saneamento, destaca-se os seguintes parágrafos:

- IV – Garantir a preservação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos bem como a **recuperação de cursos d'água degradados**;
- VI – Promover a recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APP) e das áreas degradadas no meio urbano e rural;
- XVI – Melhorar o **sistema de drenagem pluvial e controle de inundações**;
- IX – Desenvolver programa permanente de educação socioambiental e sanitária para agentes públicos e população em geral (PMM, 2022).

Nesse sentido, o Plano Diretor incorpora macrodiretrizes importantes em termos da melhoria dos cursos hídricos e de saneamento. Quanto aos loteamentos, o Art. 177 especifica responsabilidades ao loteador com obrigações mínimas quanto ao seu empreendimento, destaca-se os parágrafos:

- II – Implantação da infraestrutura urbana básica constituída pelos equipamentos urbanos de **escoamento das águas pluviais**, iluminação

pública, esgotamento sanitário, abastecimento de água potável, energia elétrica pública e domiciliar e vias de circulação pavimentadas;
IV – Avaliação e apresentação de **soluções de drenagem do empreendimento de acordo com a capacidade de vazão** dos locais de deságue de águas pluviais conforme apurado em Estudo de Impacto de Vizinhança (PMM, 2022).

Ainda quanto aos empreendimentos, o Art. 201 destaca algumas restrições para os empreendimentos em sistema de condomínio de lotes. Assim, ressalta-se o inciso 2º deste artigo e o seguinte parágrafo:

§ 2º. Deverá o empreendedor executar as seguintes obras de infraestrutura internamente ao empreendimento, bem como a interligação delas ao sistema público nas vias lindeiras, de acordo com os projetos aprovados pelos departamentos técnicos da Prefeitura Municipal e demais autarquias, que fornecerão diretrizes e análise à moldes de Loteamento:
II – **Construção do sistema de escoamento de águas pluviais**, inclusive o sistema de retenção e retardamento do fluxo de águas pluviais, atendendo legislação municipal específica vigente e especificações formuladas pelos órgãos competentes (PMM, 2022);

A bacia do Barro Preto teve uma parte da sua área a montante parcelada para um novo loteamento, o Terrae. Não se sabe se todos os itens deste plano foram cumpridos, até porque o Plano Diretor foi aprovado no final de 2022. Mas ainda quando o parágrafo II, inciso 2º do Art. 201 menciona “[...] atendendo legislação municipal específica vigente e especificações formuladas pelos órgãos competentes”, pode-se dizer que tais especificações não foram criadas e regulamentadas pela legislação municipal como, por exemplo, manuais de drenagem e o Plano Diretor de Drenagem Urbana - PDDU.

Quanto a esta questão, como o município não possui um PDDU ou até mesmo algum manual técnico com especificações para projetos de drenagem urbana, logo, caberá ao servidor responsável pela aprovação de um novo empreendimento verificar se o Estudo de Impacto de Vizinhança está aderente quanto à quantificação e qualificação dos impactos hídricos e hidráulicos. Ainda assim, como não há uma especificação técnica instituída, torna-se uma tarefa mais complexa e subjetiva sem o amparo técnico normativo.

Apesar do município não possuir um PDDU, o Plano Diretor destaca como ações públicas prioritárias para o desenvolvimento sustentável, dentre vários setores, o de saneamento. Assim, destaca-se os seguintes parágrafos do Art. 303:

II – **Proteção das bacias hidrográficas de contribuição** aos pontos de captação de água para o abastecimento público em todo o Município, priorizando as captações da região da Serrinha;

III – **Elaboração do Plano de Macrodrenagem da Bacia do Ribeirão do Carmo**, que deve prever as etapas de diagnóstico, estudos hidrológico e hidráulico dos principais cursos d'água da bacia bem como diretrizes que visam **reduzir as ocorrências de enchentes e inundações**;

VII – **Implantação do projeto de interceptores e estação de tratamento de esgotos do distrito sede**, com elaboração de projetos de melhoria do sistema de esgotamento sanitário dos distritos, visando a universalização do atendimento com captação e destinação adequada dos efluentes domésticos e tratamento adequado aos dejetos provenientes da criação de animais.

IX – Elaboração do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos com a finalidade de dar destinação adequada ao lixo urbano, reduzir a produção de resíduos promovendo a segregação e reciclagem.

X – **Elaboração do Diagnóstico Socioambiental das microbacias de drenagem afetadas por ocupação urbana consolidada no distrito sede** (PMM, 2022).

Ainda, o parágrafo X do Art. 303 cita que a microbacia do Barro Preto faz parte das microbacias afetadas pela ocupação urbana. Ou seja, foi reconhecido no instrumento normativo que a bacia de estudo precisa de atenção. Como o córrego não tem nome oficial, sendo denominada bacia do Barro Preto neste estudo, o Plano Diretor (Art. 142, parágrafo V), define a bacia como microbacia com o seguinte detalhamento: “o lacrimal que margeia o bairro Jardim dos Inconfidentes até a foz no Ribeirão do Carmo” (PMM, 2022). Esse esclarecimento é para enfatizar que a bacia de estudo e a microbacia especificada no Plano Diretor são as mesmas.

Destaca-se que o córrego do Barro Preto não possui nomenclatura oficial, sendo definido como lacrimal. Vale ressaltar que o município tem até o final de 2024 para a elaboração do diagnóstico das microbacias, conforme especificado Art. 143 “O Município deverá elaborar Diagnóstico Socioambiental das microbacias identificadas no artigo anterior, no prazo de até dois anos a contar da aprovação desta lei”(PMM, 2022).

Apesar de o Plano Diretor de Mariana definir novos tipos de zoneamentos para o município, bem como diferentes taxas de permeabilidade conforme a zona e a área do lote, não há diretrizes para a detenção das águas pluviais como forma de haver um amortecimento das cheias.

Destacando-se o exemplo de Belo Horizonte, no Plano Diretor há especificação para a construção de microrreservatórios para o armazenamento de águas pluviais, sendo detalhado para algumas zonas de ocupação, também considerando a área do lote e uma taxa de permeabilidade mínima (Figura 24). Destaca-se a necessidade de verificar as normas técnicas da ABNT: “Instalações prediais de águas pluviais - NBR 10844” e “Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - NBR 15527/2019”.

Zona de ocupação	Taxa de permeabilidade mínima		Capacidade do microrreservatório (m ³)	
	A ≤ 360 m ²	A > 360 m ²	A ≤ 360 m ²	A > 360 m ²
ZA - Zona adensada	10%	20%	30 L . 0,1.A = 0,003A	30 L . 0,2.A = 0,006A
ZAP - Zona de Adensamento Preferencial				
ZAR – Zona de Adensamento Restrito				
ZC - Zona Central				
ZE - Zona de Grandes Equipamentos				

Obs.: “A” corresponde a área do lote

Figura 24 - Capacidade do microrreservatório

Fonte: Lei Municipal nº 9.959/10 de Belo Horizonte

4.5 PROPOSIÇÕES DE MELHORIA DA QUALIDADE E CAPACIDADE HIDRÁULICA DO CÓRREGO

Mediante ao estudo apresentado, é possível propor medidas estruturais e não estruturais de melhoria da qualidade do corpo hídrico da bacia.

4.5.1 Medidas estruturais

Uma das medidas essenciais para que haja uma melhora significativa da capacidade hidráulica do canal é a realização do desassoreamento em todos os trechos do mesmo. Devido a todos os fatores antrópicos e naturais apontados, a sedimentação de partículas sólidas no canal limita a capacidade plena das estruturas artificiais existentes no talvegue.

Sendo assim, recomenda-se que o período de limpeza seja entre os meses de agosto a outubro, um pouco antes do período chuvoso. O desassoreamento pode ter auxílio de maquinário mecânico, hidráulico ou de sucção para a realização de dragagem e desassoreamento em todos os trechos. Dependendo do tamanho do maquinário, alguns trechos teriam que passar por limpeza manual.

Diversas cidades do Brasil já possuem programas de limpeza e dragagem dos cursos d'água. Um exemplo é o município de Curitiba – PR, que investiu em diversas ações para conter e drenar chuvas, dentre elas, a realização de em mais de 360 mil metros de limpeza e desassoreamento de córregos e canais da cidade (PREFEITURA DE CURITIBA, 2023).

O despejo de efluentes domésticos é um outro problema ambiental que impacta em termos da qualidade do corpo hídrico. Além de causar odores desagradáveis para a população, a alta carga de matéria orgânica acelera o processo de eutrofização, alterando todo o ecossistema aquático da região. Tal problema possivelmente será resolvido no futuro. Isso porque foi iniciada a 1ª Etapa das Obras de Esgotamento Sanitário de Redes Coletoras e Interceptoras com investimento inicial de R\$53.560.185,53, sendo aprovado pelo Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais – BDMG (VAREJANO, 2023).

Uma outra medida estrutural possível de se implantar na bacia de estudo é o alargamento do Trecho 4. Em termos de espaço, há uma área com vegetação que

margeia o talvegue, sendo mais simples a intervenção sem necessitar de análises estruturais, como é o caso do Trecho 5. Entende-se que, devido a uma laje de concreto implantada acima do córrego no Trecho 5, projetada para suportar a travessia de carros, uma ampliação de tal trecho eleva o nível de complexidade.

Mediante a isso, foi proposta uma geometria para ser adequada no Trecho 4, considerando um TR de 25 anos e uma mudança do revestimento do canal, com o objetivo de reduzir a velocidade de escoamento encontrada nos resultados apresentados anteriormente. Assim, adotou-se um alargamento de 1 metro, onde há o estreitamento da largura, e uma escavação para que a profundidade do canal chegue a 2 metros, considerando aproximadamente 10% de borda livre acima da profundidade de fluxo (Tabela 13).

Tabela 13 – Dimensões e parâmetros hidráulicos do Trecho 4 – TR 25 anos

Largura (m)	4
Altura (m)	2
Coefficiente de <i>Manning</i>	0,030
Declividade média (m/m)	0,0206
Revestimento	Gabião Caixa
Vazão (m³/s)	33,6
Velocidade (m/s)	4,63
Número de Froude	1,1
Profundidade do fluxo (m)	1,81

Como alternativa para reduzir um pouco a velocidade de escoamento, recorreu-se ao revestimento de gabião como revestimento alternativo ao de concreto existente. O gabião possui rugosidade elevada, podendo ser uma solução para o Trecho 4. Conforme os valores obtidos, ressalta-se que os gabiões caixa da MACCAFERRI têm espessura de 0,50 m, ou seja, sua altura tem que ser múltiplos da espessura estipulada pelo fabricante. Segundo a MACCAFERRI (2017), o gabião caixa tem velocidade crítica de 5,5 m/s e velocidade limite de 6,4 m/s. Sendo assim, a velocidade

obtida pela nova geometria está abaixo da crítica do revestimento. O número de Froude ainda é supercrítico, mas muito próximo do regime crítico. A Figura 25 é uma representação visual do canal com o novo revestimento de gabião caixa.

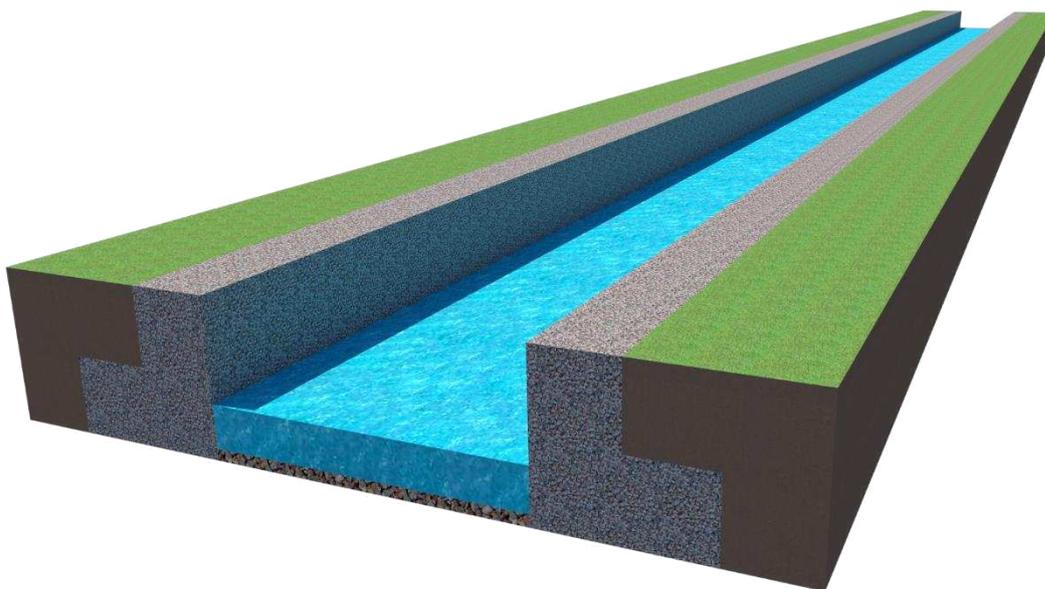


Figura 25 - Representação visual do canal do Trecho 4 (sem escala)

Softwares: SketchUp Pro 2021 e V-Ray 3.6.

É importante destacar que, apesar de tal alargamento do Trecho 4 se adequar à vazão de referência, não se consegue garantir que as medidas de desassoreamento, escavação e alargamento vão evitar que o nível d'água não exceda a altura projetada por conta da restrição do Trecho 5. Contudo, tais medidas irão minimizar os efeitos da inundação que vêm atingindo as populações afetadas.

Ressalta-se ainda, para estudos futuros na bacia, a importância de realizar o cadastro das singularidades, seções topobatimétricas dos trechos natural e artificiais, para que se possa simular a dinâmica de escoamento hidráulico em diferentes trechos considerando diferentes chuvas de projeto.

4.5.2 Medidas não estruturais

Em termos de legislações, o Plano Diretor de Mariana de 2022 preconiza inúmeras ações prioritárias para garantir a qualidade dos corpos hídricos no âmbito do saneamento básico. Assim, medidas não estruturais, como políticas públicas, são importantes para ajudar a minimizar o impacto das vazões para a situação atual da área de estudo.

A adoção de um programa de conscientização da população local quanto ao despejo de resíduos em mananciais pode ser adotada como política pública. Tal programa pode ser difundido tanto em escolas, quanto para as populações residentes nos bairros Morada do Sol, Rosário, Jardim dos Inconfidentes e demais bairros que o córrego abrange ao longo do trajeto.

Além disso, evidencia-se a importância de elaborar um Plano Diretor de Drenagem Urbana para Mariana. Tal instrumento tem extrema importância para realizar o cadastro das estruturas de macrodrenagem e analisar suas respectivas capacidades, além de trazer especificações técnicas de intensidades a serem adotadas pelas relações IDF, bem como as metodologias a serem adotadas para a extração dos parâmetros fisiográficos futuramente.

Uma outra medida importante é o incentivo do uso de Técnicas Compensatórias (TC) em Drenagem Urbana como política pública e como instrução técnica. Tais técnicas, segundo Oliveira, Barbassa e Gonçalves (2016), consistem em soluções que facilitam o processo de infiltração das águas pluviais, amortecendo uma parcela da vazão de pico com a diminuição do escoamento superficial. Destacam-se as seguintes TC: pavimento poroso, telhados verdes, poços/trincheiras de infiltração, bacias de retenção, microrreservatórios, dentre outros.

Estudos aplicando as TC tiveram resultados expressivos na redução da vazão de pico em bacias muito urbanizadas em Belo Horizonte. Segundo Pereira *et al.*

(2022b), a aplicação das TC resultou em uma redução de 20,6% da vazão de pico para o TR de 10 anos na bacia Córrego Cachoeirinha. Para o mesmo TR, em outras bacias em Belo Horizonte, obteve-se reduções de 22,1% (PEREIRA *et al.*, 2022a) e até de 51% (SANTOS *et al.*, 2022) da vazão de pico. Esses resultados variam, pois depende de áreas disponíveis válidas para aplicação de uma ou mais TC's em cada bacia de estudo.

Em termos da aplicação das TC como política pública, destaca-se o programa “Quem preserva paga menos” que garante um benefício do IPTU Verde no município de Ouro Preto – MG. Conforme informações da Prefeitura de Ouro Preto (2023), haverá um desconto de 5% para quem possuir sistema de captação de água da chuva. Além disso, no âmbito dos resíduos sólidos, o programa oferece desconto de até 10% para quem realizar coleta seletiva. Um programa similar é possível de ser aplicado em Mariana tendo em vista as especificidades do município.

Todas essas medidas estão em consonância com as macrodiretrizes para o saneamento contidas no Art. 9 do Plano Diretor de Mariana (PMM, 2022). Também, as medidas propostas estão em acordo com os princípios do controle de inundações urbanas de Tucci *et al.* (1993). Mediante a toda essa análise, pode-se partir para as considerações finais do presente estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do Barro Preto foi acometida por um processo intenso de urbanização nos últimos 17 anos. Muitas áreas foram ocupadas de forma irregular, sem a fiscalização do atendimento dos parâmetros urbanísticos exigidos pela legislação vigente na época. Com isso, resultou-se no aumento considerável de áreas impermeabilizadas pelas edificações e pavimentação asfáltica. As zonas residenciais aumentaram em 255,45%, ao passo que as áreas naturais tiveram reduções de até 71,70%. Todas as sub-bacias tiveram aumentos expressivos da área impermeável.

Diante disso, o impacto das vazões de escoamento superficial no sistema de macrodrenagem foi significativo. Em 17 anos, para o TR de 10 anos, a vazão de pico quase dobrou, com o aumento de 92%; para os TR de 25 e 50 anos houve aumentos de 72% e 62%, respectivamente. O sistema de macrodrenagem existente (Trecho 4) não suporta as vazões simuladas para o cenário de 2024.

O evento que atingiu a região em 2023 correspondeu a uma chuva com TR de 10 anos. Tendo isso como referência, em 2007, o canal do Trecho 4 suportava essa chuva, mas em 2024, o canal não suporta, tendo uma lâmina d'água excedente de 25 centímetros. Cabe ressaltar que a modelagem hidráulica é a mais indicada para calibrar os parâmetros a partir das cotas obtidas no evento de 2023, mas não foi possível realizar tal modelagem em função da falta de dados cadastrais do sistema de macrodrenagem.

Destaca-se a importância da elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana para o município, visando um diagnóstico das redes, bem como especificações técnicas a serem adotados para estudos hidrológicos e hidráulicos. Apesar do Plano Diretor trazer diretrizes que favoreçam a adoção de medidas mais sustentáveis e de mitigação de inundações, é necessária vontade política para que as diretrizes sejam cumpridas.

A realização de limpezas e desassoreamento no córrego é fundamental para garantir o desempenho esperado para as estruturas de macrodrenagem já existentes na região. Sugere-se uma ampliação do Trecho 4, para ser aplicada em conjunto com as medidas de desassoreamento, programas de educação da população local e políticas públicas. Essa combinação pode minimizar e mitigar os impactos das inundações que afetaram e afetarão a área de estudo. Ainda assim, eventos superiores aos TR projetados acarretariam inundações, sendo necessária a implantação de sistemas de alerta apropriados para as populações em áreas de risco.

Portanto, o processo de urbanização ordenado e desordenado na bacia do Barro Preto causaram impactos ambientais e antrópicos, seja por conta do despejo de efluentes domésticos e resíduos sólidos, ou por conta das inundações que atingiram a região mais baixa da bacia. Assim, recomenda-se que o município priorize a drenagem urbana e crie políticas pública eficazes no que tange o uso e ocupação do solo, e redução dos impactos ambientais de poluição dos corpos hídricos.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, G. R.; BAPTISTA, M. B.; MARINHO, J. **Manual Técnico do SisCCoH** / Gladstone Rodrigues Alexandre. Márcio Benedito Baptista, Josiane Marinho Barcelos. – 1. Ed. - Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. [s.l.] EHR UFMG, 2019.

ARAÚJO, L. E. DE et al. Bacias hidrográficas e impactos ambientais. *Qualit@ s Revista Eletrônica*, v. 8, n. 1, 2009.

BAPTISTA, M. B.; CARDOSO, A. S. Rios e cidades: uma longa e sinuosa história... *Revista da Universidade Federal de Minas Gerais*, v. 20, n. 2, p. 124–153, 2013.

BRASIL. MAPEAMENTO DE RISCOS EM ENCOSTAS E MARGENS DE RIOS. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **MANUAL PARA APRESENTAÇÃO DE PROPOSTAS PARA SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL E DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS**. [s.l.] SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2020.

CHAVEZ, J. D. R. **Notas de Aula - HIDROLOGIA E HIDRÁULICA APLICADAS (LOB1216)**: escoamento – Canais, Fórmulas Empíricas, perda de carga. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Lorena: [s.n.].

CLIMATE DATA. **Clima: Mariana - MG**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/mariana-25091/>>. Acesso em: 30 jul. 2023

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-DOCE). **A bacia**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em: 1 jun. 2024

CUNHA, S. F. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 837–848, 2015.

DEFESA CIVIL DE MARIANA. Inundação na Travessa Monsenhor Rafael Coelho, Barro Preto, Mariana - MG. , 2023.

DIRETÓRIO DE RUAS. , 2019. Disponível em: <<https://www.diretorioderuas.com/BR/Minas-Gerais/>>. Acesso em: 1 ago. 2023

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.

ESCARIÃO, R. D. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Negro na Amazônia**. PhD Thesis—[s.l.] Dissertação de M. Sc., Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2001.

GIORDANI, L. C. **Modelagem hidrológica e hidráulica no rio Maranguapinho mediante cenário de mudanças climáticas**. 2018.

GOMES, E. S. **A dinâmica hidrológica fluvial em bacias hidrográficas com diferentes taxas de impermeabilização do solo em Guarapuava/PR**. 2014.

HUFF, F. A. *Time distribution of rainfall in heavy storms*. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007–1019, dez. 1967.

IBGE CIDADES. **Panorama: Mariana - MG**. IBGE (Brasil), 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/mariana/panorama>>. Acesso em: 1 ago. 2022

MACCAFERRI. **Manual Técnico - Revestimento de canais e cursos de água**. [s.l.] ABMS, 2017.

MELLO, S. S. DE. As funções ambientais e as funções de urbanidade das margens de cursos d'água. **Oculum Ensaios**, n. 4, p. 46–61, 2005.

OLIVEIRA, A. P. DE; BARBASSA, A. P.; GONÇALVES, L. M. Aplicação de técnicas compensatórias de drenagem na requalificação de áreas verdes urbanas em Guarulhos-SP. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 4, n. 9, 2016.

PALLA, A.; GNECCO, I. *Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale*. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 361–368, 1 set. 2015.

PEREIRA, G. C.; SILVA, B.-C. N. **Geoprocessamento e urbanismo**. 2001.

PEREIRA, J. A. et al. **MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA: UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS**. XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2022a.

PEREIRA, L. **Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana**. 2008. 90 p. [s.l.] INPE-15679-TDI/1453). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto ..., 2009.

PEREIRA, M. F. S. et al. **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NA BACIA Córrego Cachoeirinha com Modelagem Hidráulico-**

HIDROLÓGICA. 32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022b.

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

PMM. **Lei Complementar nº228/2022**. Institui o Plano Diretor do Município de Mariana e dá outras providências. . 22 dez. 2022.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. *Runoff curve number: Has it reached maturity?* **Journal of hydrologic engineering**, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

PORTO, M. F.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 43–60, 2008.

PREFEITURA DE CURITIBA. **Em áreas estratégicas, parques alagáveis de Curitiba servem para conter e drenar águas das chuvas**. Cidades esponja, 30 out. 2023. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/em-areas-estrategicas-parques-alagaveis-de-curitiba-servem-para-conter-e-drenar-aguas-das-chuvas/70983>>. Acesso em: 18 jun. 2024

PREFEITURA DE OURO PRETO. **Desconto no IPTU**. Prefeitura de Ouro Preto, 2023. Disponível em: <<https://www.ouropreto.mg.gov.br/noticia/3380#:~:text=Prefeitura%20Municipal%20de%20Ouro%20Preto&text=Est%C3%A3o%20abertas%2C%20at%C3%A9%20o%20dia,para%20o%20ano%20de%202024.>>. Acesso em: 6 maio. 2024

QUINONEZ FERNANDEZ, O. EFEITOS DA MUDANÇA DO USO DA TERRA SOBRE A VAZÃO MÁXIMA NO CÓRREGO MATILDE-CUÊ, MARECHAL CÂNDIDO RONDON, PARANÁ. **REVISTA GEOGRAFAR**, v. 14, p. 131, 26 ago. 2019.

REIS FILHO, A. A. DOS; MOURA, A. C. **Contribuição do geoprocessamento para o estatuto da cidade como ferramenta para o planejamento e gestão urbana**. VI Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Bogotá, junio 2014. Anais...Departament d'Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica ..., 2014.

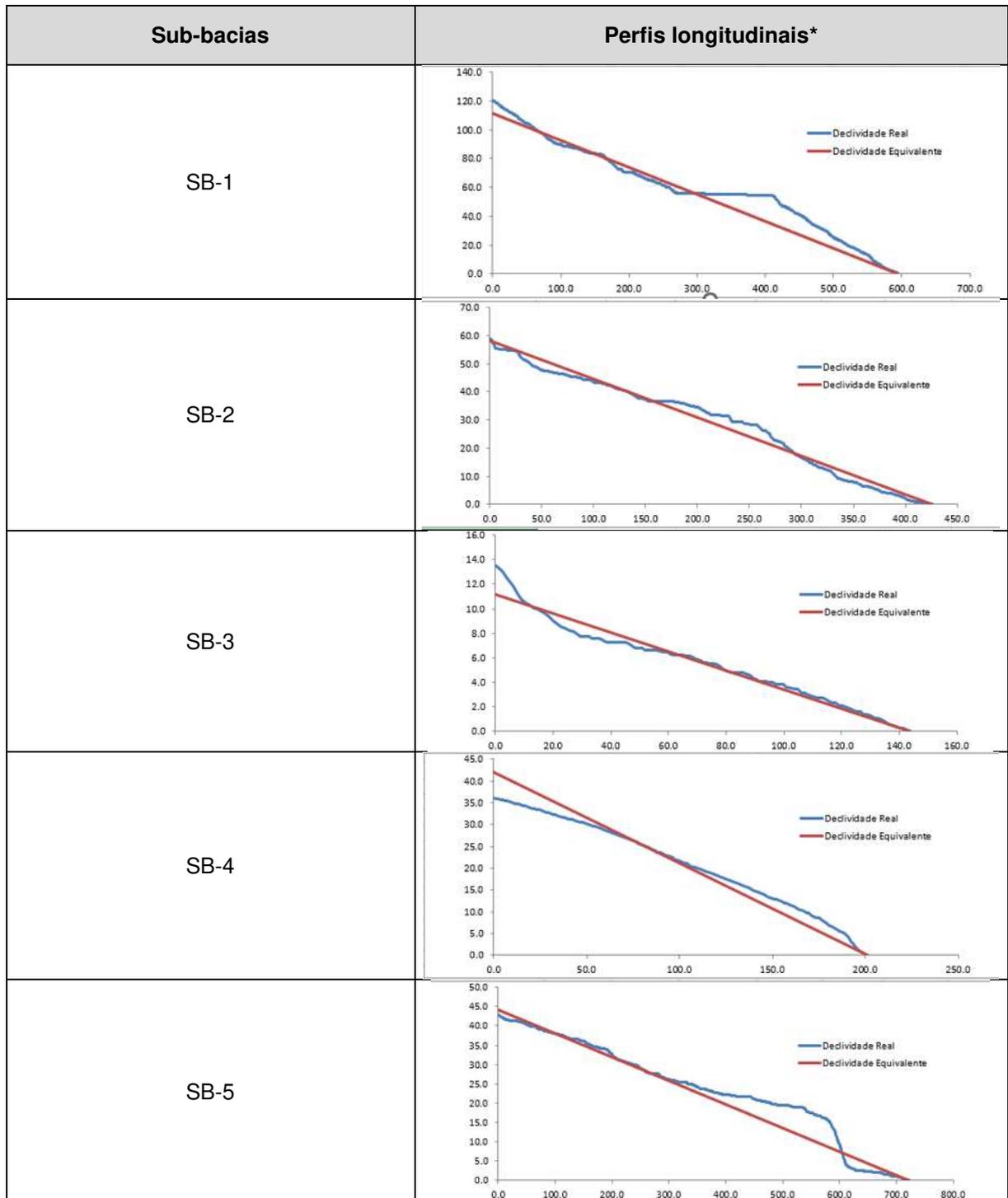
SANTOS, A. L. R. S. et al. **MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA COM O USO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA CÓRREGO ITAITUBA, MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**. XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2022.

- SARTORI, A. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/UNICAMP, 2010.
- SILVEIRA, A. L. L. DA. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais**. Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS: ABRH. Vol. 10, n. 1 (jan./mar. 2005), p. 5-23, 2005.
- SOUZA, L. A. DE. **Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de Mariana (MG)**. 2004.
- SOUZA, R. M. DE; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. **Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial—caso de estudo bacia do Córrego Samambaia**. 2012.
- TONELLO, K. C. et al. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães-MG. **Revista Árvore**, v. 30, p. 849–857, 2006.
- TUCCI, C. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora da UFRGS/ABRH.(Coleção da ABRH de Recursos Hídricos, n. 2ª Edição, p. 943p, 2001.
- TUCCI, C. E. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1993.
- TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005a.
- TUCCI, C. E. **Gestão de águas pluviais urbanas**. [s.l.] Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de ..., 2005b. v. 1
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/Rhama, v. 11, n. 1ª, p. 289, 2007.
- TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. L. DE. **Drenagem urbana**. 1995.
- USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS**. User's Manual, 2022. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>>. Acesso em: 5 jul. 2023
- VAREJANO, IGOR. **Mariana realizará maior obra de saneamento da história da cidade**. , 27 jul. 2023. Disponível em: <<https://galile.com.br/mariana-obra-de-saneamento/>>. Acesso em: 5 maio. 2024
- VARGAS, A. C. V.; WERNECK, B. R.; FERREIRA, M. I. P. Controle de cheias urbanas. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, v. 2, n. 2, p. 107–132, 2008.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975.

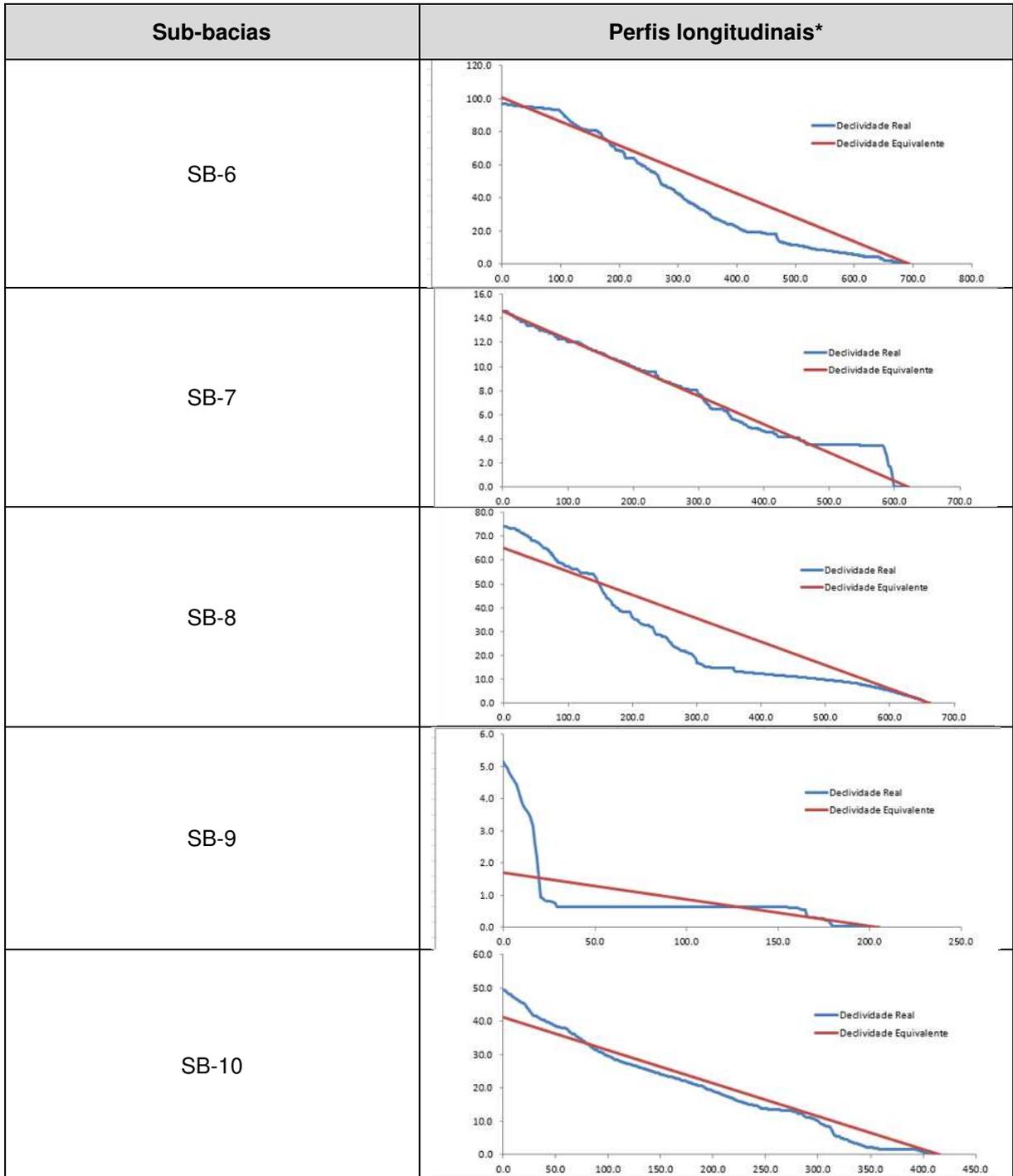
WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Geologia** - Tradução da 2ª edição norte-americana. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2017.

APÊNDICE A – PERFIS LONGITUDINAIS DA HIDROGRAFIA PRINCIPAL DE CADA SUB-BACIA E TRECHOS DE RIO



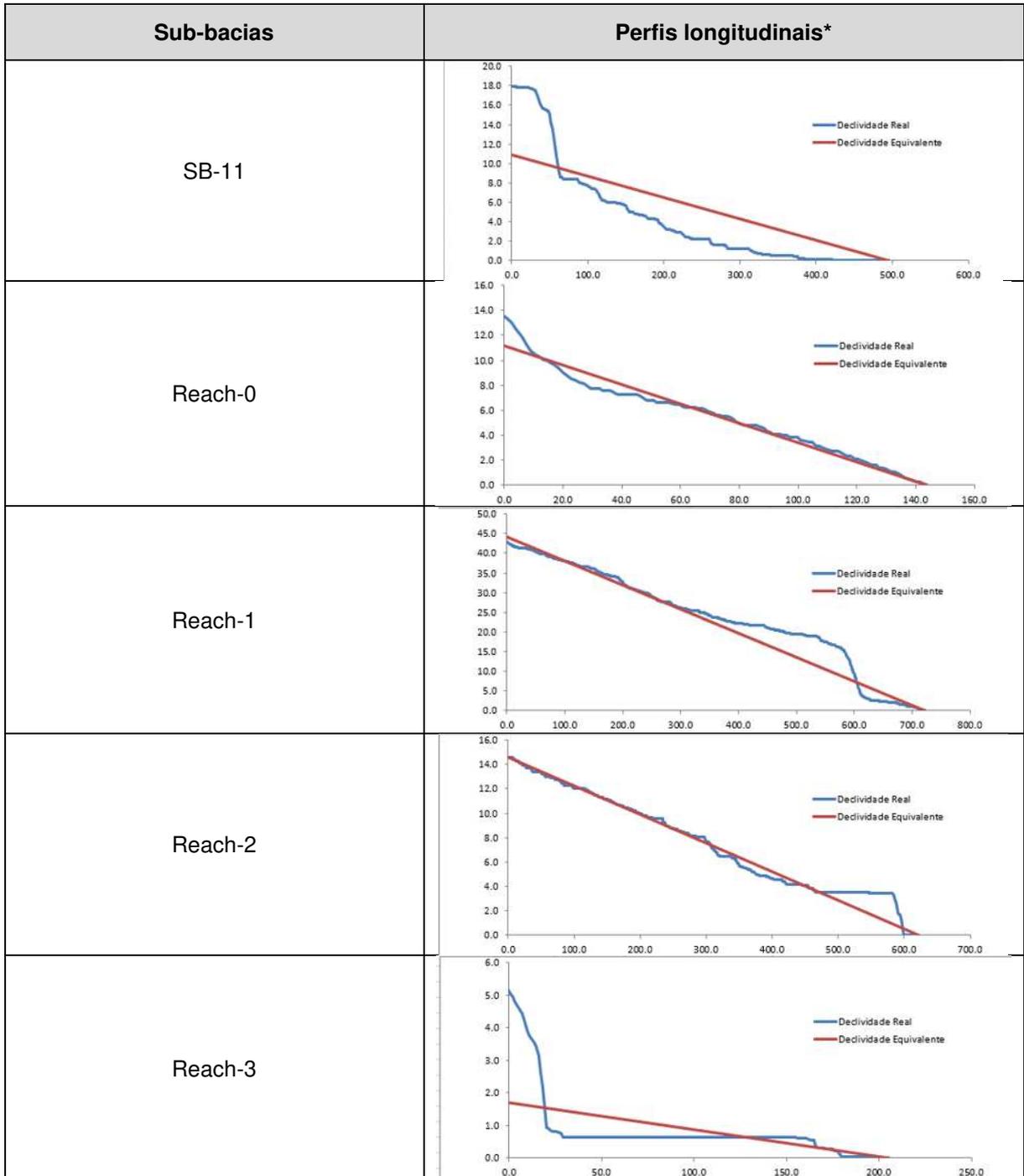
APÊNDICE A – PERFIS LONGITUDINAIS DA HIDROGRAFIA PRINCIPAL DE CADA SUB-BACIA E TRECHOS DE RIO

(Continuação)



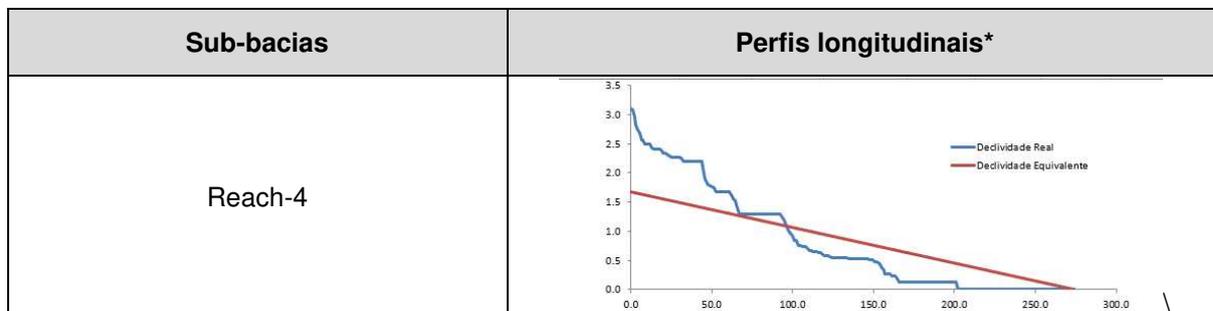
APÊNDICE A – PERFIS LONGITUDINAIS DA HIDROGRAFIA PRINCIPAL DE CADA SUB-BACIA E TRECHOS DE RIO

(Continuação)



APÊNDICE A – PERFIS LONGITUDINAIS DA HIDROGRAFIA PRINCIPAL DE CADA SUB-BACIA E TRECHOS DE RIO

(Continuação)



* Observação: o eixo x representa a distância acumulada, em metros, e o eixo y representa as diferenças de nível, em metros

APÊNDICE B – CHUVAS DE PROJETO

B.1 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 30 MINUTOS

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
1	3,33%	1,8092	2,1494	2,4483
2	6,67%	2,5813	3,0666	3,4931
3	10,00%	3,9485	4,6908	5,3432
4	13,33%	5,0016	5,942	6,7684
5	16,67%	5,3506	6,3565	7,2406
6	20,00%	5,0134	5,956	6,7843
7	23,33%	4,2284	5,0234	5,7221
8	26,67%	3,2878	3,9059	4,4491
9	30,00%	2,4259	2,882	3,2828
10	33,33%	1,771	2,104	2,3966
11	36,67%	1,3471	1,6003	1,8229
12	40,00%	1,1076	1,3159	1,4989
13	43,33%	0,97899	1,1631	1,3248
14	46,67%	0,89575	1,0642	1,2122
15	50,00%	0,81986	0,97401	1,1095
16	53,33%	0,74151	0,88093	1,0034
17	56,67%	0,66773	0,79327	0,9036
18	60,00%	0,60756	0,72179	0,82218
19	63,33%	0,56222	0,66793	0,76082
20	66,67%	0,52453	0,62315	0,70982
21	70,00%	0,48655	0,57803	0,65842
22	73,33%	0,44872	0,53309	0,60723
23	76,67%	0,42222	0,50161	0,57137
24	80,00%	0,41923	0,49805	0,56731
25	83,33%	0,43492	0,51669	0,58855
26	86,67%	0,43681	0,51894	0,59111
27	90,00%	0,38335	0,45542	0,51876
28	93,33%	0,27963	0,33221	0,37841
29	96,67%	0,21646	0,25716	0,29293
30	100,00%	0,19161	0,22764	0,2593

B.2 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1 HORA

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
1	1,67%	1,1902	1,414	1,6109
2	3,33%	1,2348	1,4669	1,6712
3	5,00%	1,5145	1,7992	2,0498
4	6,67%	1,9453	2,311	2,6329
5	8,33%	2,4231	2,8786	3,2796
6	10,00%	2,8692	3,4086	3,8833
7	11,67%	3,2299	3,837	4,3715
8	13,33%	3,4741	4,1271	4,702
9	15,00%	3,5901	4,265	4,859
10	16,67%	3,5816	4,2548	4,8474
11	18,33%	3,4632	4,1141	4,6871
12	20,00%	3,2566	3,8688	4,4076
13	21,67%	2,9872	3,5487	4,0429
14	23,33%	2,6805	3,1843	3,6278
15	25,00%	2,3602	2,8039	3,1944
16	26,67%	2,0466	2,4313	2,7699
17	28,33%	1,7551	2,085	2,3754
18	30,00%	1,4965	1,7778	2,0254
19	31,67%	1,2766	1,5166	1,7279
20	33,33%	1,0972	1,3034	1,4849
21	35,00%	0,95619	1,1359	1,2941
22	36,67%	0,84938	1,009	1,1496
23	38,33%	0,77079	0,91568	1,0432
24	40,00%	0,71386	0,84805	0,96616
25	41,67%	0,67217	0,79852	0,90973
26	43,33%	0,64004	0,76034	0,86625
27	45,00%	0,61294	0,72816	0,82957
28	46,67%	0,58769	0,69816	0,7954
29	48,33%	0,56244	0,66816	0,76122
30	50,00%	0,53648	0,63733	0,72609
31	51,67%	0,51004	0,60591	0,6903
32	53,33%	0,48386	0,57481	0,65487
33	55,00%	0,45892	0,54518	0,62112
34	56,67%	0,43608	0,51805	0,59021
35	58,33%	0,41589	0,49407	0,56288
36	60,00%	0,39846	0,47336	0,53929
37	61,67%	0,38344	0,45552	0,51896

B.2 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1 HORA

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
38	63,33%	0,37014	0,43972	0,50096
39	65,00%	0,35771	0,42494	0,48413
40	66,67%	0,34536	0,41028	0,46742
41	68,33%	0,33263	0,39516	0,4502
42	70,00%	0,31952	0,37959	0,43245
43	71,67%	0,30659	0,36422	0,41494
44	73,33%	0,29487	0,35029	0,39908
45	75,00%	0,28568	0,33938	0,38665
46	76,67%	0,28026	0,33294	0,37931
47	78,33%	0,27931	0,33182	0,37803
48	80,00%	0,2826	0,33572	0,38248
49	81,67%	0,28859	0,34283	0,39058
50	83,33%	0,29437	0,3497	0,39841
51	85,00%	0,29604	0,35168	0,40066
52	86,67%	0,28945	0,34386	0,39176
53	88,33%	0,27161	0,32266	0,3676
54	90,00%	0,24222	0,28775	0,32783
55	91,67%	0,20528	0,24387	0,27783
56	93,33%	0,16953	0,20139	0,22944
57	95,00%	0,14648	0,17401	0,19825
58	96,67%	0,14366	0,17067	0,19444
59	98,33%	0,14961	0,17773	0,20248
60	100,00%	0,10723	0,12738	0,14512

B.3 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1,5 HORA

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
1	1,11%	0,92671	1,1009	1,2542
2	2,22%	0,91691	1,0893	1,241
3	3,33%	0,97692	1,1606	1,3222
4	4,44%	1,1246	1,336	1,522
5	5,56%	1,3306	1,5807	1,8008
6	6,67%	1,569	1,864	2,1235
7	7,78%	1,8179	2,1596	2,4603
8	8,89%	2,0591	2,4462	2,7868
9	10,00%	2,2786	2,707	3,0838
10	11,11%	2,4657	2,9293	3,3372
11	12,22%	2,6136	3,105	3,5372
12	13,33%	2,7181	3,2291	3,6787
13	14,44%	2,778	3,3003	3,7597
14	15,56%	2,7941	3,3195	3,7816
15	16,67%	2,7693	3,2899	3,748
16	17,78%	2,7075	3,2166	3,6644
17	18,89%	2,614	3,1054	3,5378
18	20,00%	2,4942	2,9632	3,3757
19	21,11%	2,3543	2,797	3,1864
20	22,22%	2,2002	2,6138	2,9778
21	23,33%	2,0375	2,4205	2,7576
22	24,44%	1,8715	2,2233	2,5328
23	25,56%	1,7068	2,0276	2,3099
24	26,67%	1,5473	1,8382	2,0942
25	27,78%	1,3964	1,6589	1,8899
26	28,89%	1,2564	1,4927	1,7005
27	30,00%	1,1291	1,3414	1,5281
28	31,11%	1,0154	1,2063	1,3743
29	32,22%	0,91572	1,0879	1,2393
30	33,33%	0,82983	0,98584	1,1231
31	34,44%	0,75706	0,8994	1,0246
32	35,56%	0,69641	0,82734	0,94253
33	36,67%	0,64658	0,76814	0,87508
34	37,78%	0,60611	0,72007	0,82032
35	38,89%	0,57349	0,68131	0,77617
36	40,00%	0,54719	0,65007	0,74058
37	41,11%	0,52578	0,62463	0,71159

B.3 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1,5 HORA

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
38	42,22%	0,50793	0,60343	0,68744
39	43,33%	0,49251	0,58511	0,66657
40	44,44%	0,47858	0,56856	0,64772
41	45,56%	0,46541	0,55291	0,62989
42	46,67%	0,45246	0,53753	0,61237
43	47,78%	0,43942	0,52204	0,59472
44	48,89%	0,42614	0,50625	0,57674
45	50,00%	0,41259	0,49016	0,55841
46	51,11%	0,3989	0,4739	0,53988
47	52,22%	0,38525	0,45768	0,5214
48	53,33%	0,37185	0,44176	0,50327
49	54,44%	0,35894	0,42642	0,48579
50	55,56%	0,34671	0,41189	0,46924
51	56,67%	0,33533	0,39837	0,45384
52	57,78%	0,32489	0,38597	0,43971
53	58,89%	0,31542	0,37472	0,42689
54	60,00%	0,30687	0,36456	0,41532
55	61,11%	0,29912	0,35536	0,40483
56	62,22%	0,29201	0,34691	0,39521
57	63,33%	0,28536	0,33901	0,38621
58	64,44%	0,27895	0,33139	0,37753
59	65,56%	0,27261	0,32386	0,36895
60	66,67%	0,26618	0,31623	0,36025
61	67,78%	0,2596	0,30841	0,35135
62	68,89%	0,25287	0,30041	0,34223
63	70,00%	0,24605	0,29231	0,33301
64	71,11%	0,23934	0,28434	0,32393
65	72,22%	0,23297	0,27677	0,3153
66	73,33%	0,22724	0,26996	0,30755
67	74,44%	0,22246	0,26428	0,30107
68	75,56%	0,21892	0,26008	0,29629
69	76,67%	0,21686	0,25763	0,2935
70	77,78%	0,21638	0,25706	0,29285
71	78,89%	0,21743	0,2583	0,29427
72	80,00%	0,21976	0,26108	0,29743
73	81,11%	0,22293	0,26484	0,30171

B.3 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 1,5 HORA

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
74	82,22%	0,22624	0,26878	0,3062
75	83,33%	0,22887	0,2719	0,30975
76	84,44%	0,22983	0,27304	0,31106
77	85,56%	0,22816	0,27105	0,30879
78	86,67%	0,223	0,26492	0,3018
79	87,78%	0,21378	0,25397	0,28933
80	88,89%	0,20042	0,2381	0,27124
81	90,00%	0,18344	0,21792	0,24826
82	91,11%	0,16413	0,19498	0,22213
83	92,22%	0,14453	0,1717	0,19561
84	93,33%	0,12728	0,15121	0,17226
85	94,44%	0,11515	0,1368	0,15584
86	95,56%	0,11016	0,13087	0,14909
87	96,67%	0,11216	0,13324	0,15179
88	97,78%	0,1165	0,1384	0,15767
89	98,89%	0,11073	0,13155	0,14987
90	100,00%	0,071493	0,084934	0,096759

B.4 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 2 HORAS

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
1	0,83%	0,76713	0,91132	1,0381
2	1,67%	0,76415	0,90778	1,0341
3	2,50%	0,76752	0,91179	1,0387
4	3,33%	0,82104	0,97536	1,1111
5	4,17%	0,91359	1,0853	1,2363
6	5,00%	1,0349	1,2294	1,4005
7	5,83%	1,1755	1,3965	1,5908
8	6,67%	1,3272	1,5766	1,796
9	7,50%	1,4824	1,7611	2,0062
10	8,33%	1,635	1,9423	2,2126
11	9,17%	1,7795	2,114	2,4082
12	10,00%	1,9118	2,2711	2,5872
13	10,83%	2,0284	2,4097	2,745
14	11,67%	2,1269	2,5267	2,8783
15	12,50%	2,2057	2,6203	2,9849
16	13,33%	2,2638	2,6893	3,0636
17	14,17%	2,3011	2,7336	3,114
18	15,00%	2,3177	2,7534	3,1365
19	15,83%	2,3147	2,7497	3,1324
20	16,67%	2,2931	2,7241	3,1032
21	17,50%	2,2546	2,6783	3,0511
22	18,33%	2,2009	2,6145	2,9784
23	19,17%	2,1339	2,535	2,8878
24	20,00%	2,0558	2,4422	2,7821
25	20,83%	1,9686	2,3386	2,6641
26	21,67%	1,8744	2,2268	2,5367
27	22,50%	1,7753	2,109	2,4025
28	23,33%	1,6732	1,9876	2,2643
29	24,17%	1,5698	1,8648	2,1243
30	25,00%	1,4667	1,7424	1,9849
31	25,83%	1,3655	1,6222	1,848
32	26,67%	1,2674	1,5057	1,7152
33	27,50%	1,1735	1,394	1,588
34	28,33%	1,0845	1,2884	1,4677
35	29,17%	1,0012	1,1894	1,3549
36	30,00%	0,92407	1,0978	1,2505
37	30,83%	0,85332	1,0137	1,1548

B.4 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 2 HORAS

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
38	31,67%	0,78912	0,93744	1,0679
39	32,50%	0,73143	0,8689	0,98982
40	33,33%	0,68009	0,80792	0,92035
41	34,17%	0,63484	0,75417	0,85912
42	35,00%	0,59532	0,70721	0,80563
43	35,83%	0,56109	0,66655	0,75931
44	36,67%	0,53166	0,63159	0,71948
45	37,50%	0,50652	0,60172	0,68546
46	38,33%	0,48512	0,57631	0,65651
47	39,17%	0,46695	0,55471	0,63191
48	40,00%	0,45146	0,53631	0,61095
49	40,83%	0,43816	0,52052	0,59295
50	41,67%	0,4266	0,50678	0,57731
51	42,50%	0,41636	0,49461	0,56345
52	43,33%	0,40707	0,48358	0,55087
53	44,17%	0,39841	0,4733	0,53917
54	45,00%	0,39015	0,46348	0,52798
55	45,83%	0,38206	0,45388	0,51704
56	46,67%	0,37402	0,44432	0,50615
57	47,50%	0,36591	0,43468	0,49517
58	48,33%	0,35768	0,42491	0,48404
59	49,17%	0,34933	0,41499	0,47274
60	50,00%	0,34087	0,40494	0,46129
61	50,83%	0,33235	0,39482	0,44976
62	51,67%	0,32383	0,3847	0,43823
63	52,50%	0,31539	0,37467	0,42681
64	53,33%	0,30711	0,36483	0,41561
65	54,17%	0,29907	0,35528	0,40472
66	55,00%	0,29134	0,3461	0,39427
67	55,83%	0,28398	0,33736	0,38431
68	56,67%	0,27704	0,32912	0,37492
69	57,50%	0,27055	0,3214	0,36613
70	58,33%	0,26451	0,31422	0,35795
71	59,17%	0,25891	0,30757	0,35038
72	60,00%	0,25372	0,30141	0,34336
73	60,83%	0,24891	0,29569	0,33684
74	61,67%	0,2444	0,29034	0,33074

B.4 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 2 HORAS

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
75	62,50%	0,24014	0,28528	0,32498
76	63,33%	0,23605	0,28042	0,31945
77	64,17%	0,23207	0,27569	0,31406
78	65,00%	0,22813	0,271	0,30872
79	65,83%	0,22417	0,2663	0,30336
80	66,67%	0,22015	0,26153	0,29793
81	67,50%	0,21606	0,25667	0,29239
82	68,33%	0,21188	0,25171	0,28674
83	69,17%	0,20766	0,24669	0,28102
84	70,00%	0,20342	0,24165	0,27528
85	70,83%	0,19924	0,23668	0,26962
86	71,67%	0,1952	0,23188	0,26415
87	72,50%	0,1914	0,22737	0,25902
88	73,33%	0,18795	0,22328	0,25435
89	74,17%	0,18497	0,21974	0,25032
90	75,00%	0,18256	0,21687	0,24705
91	75,83%	0,1808	0,21478	0,24467
92	76,67%	0,17976	0,21354	0,24326
93	77,50%	0,17946	0,21319	0,24286
94	78,33%	0,17989	0,2137	0,24344
95	79,17%	0,18097	0,21499	0,24491
96	80,00%	0,1826	0,21692	0,24711
97	80,83%	0,18458	0,21928	0,24979
98	81,67%	0,18669	0,22178	0,25264
99	82,50%	0,18863	0,22408	0,25527
100	83,33%	0,19008	0,22581	0,25724
101	84,17%	0,19071	0,22655	0,25808
102	85,00%	0,19015	0,22589	0,25733
103	85,83%	0,1881	0,22345	0,25455
104	86,67%	0,18429	0,21893	0,2494
105	87,50%	0,17856	0,21212	0,24164
106	88,33%	0,17087	0,20298	0,23123
107	89,17%	0,16134	0,19166	0,21834
108	90,00%	0,15028	0,17853	0,20338
109	90,83%	0,13822	0,1642	0,18705
110	91,67%	0,12587	0,14953	0,17034
111	92,50%	0,11413	0,13558	0,15445

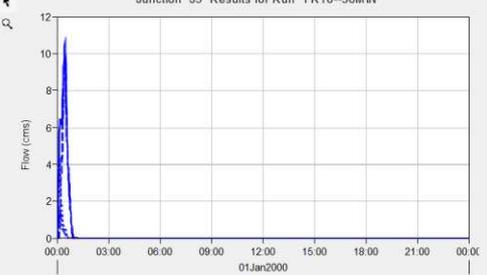
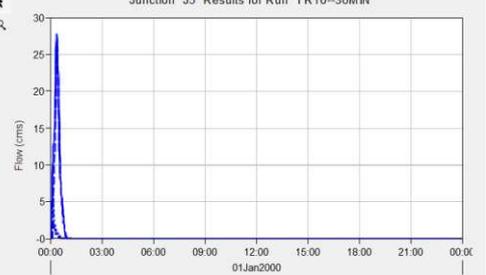
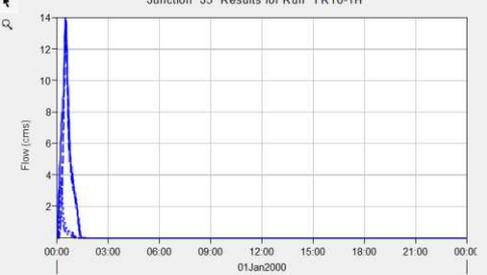
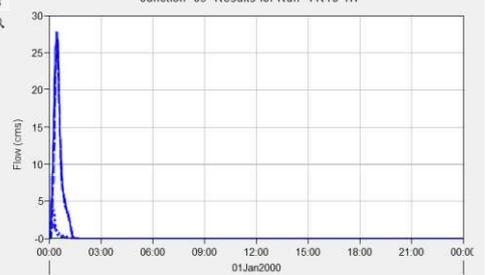
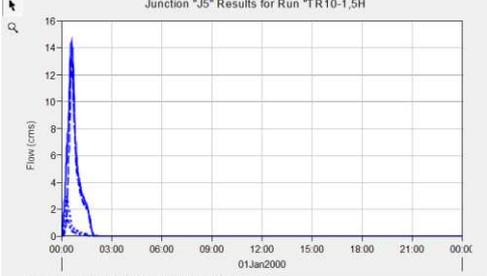
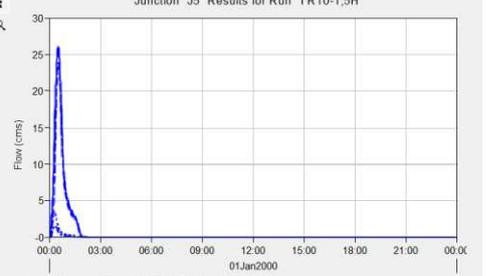
B.4 CHUVA DE PROJETO (EM MM) COM DURAÇÃO DE 2 HORAS

(Continuação)

Tempo (min)	% do Tempo	TR 10	TR 25	TR 50
112	93,33%	0,10397	0,12352	0,1407
113	94,17%	0,096373	0,11449	0,13042
114	95,00%	0,092077	0,10938	0,12461
115	95,83%	0,091333	0,1085	0,1236
116	96,67%	0,093491	0,11106	0,12652
117	97,50%	0,096463	0,11459	0,13054
118	98,33%	0,096011	0,11406	0,12993
119	99,17%	0,084812	0,10075	0,11477
120	100,00%	0,053137	0,063125	0,071909

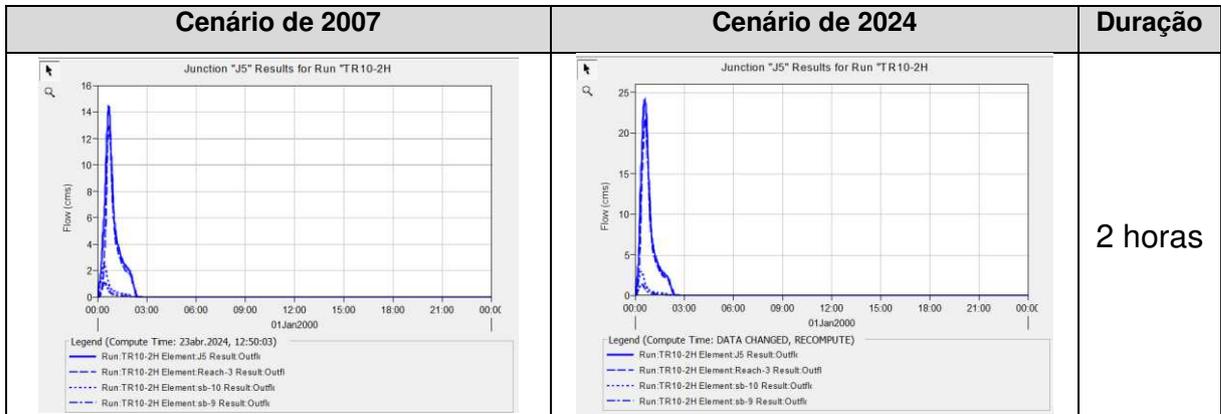
APÊNDICE C – HIDROGRAMAS DE CHEIAS

C.1 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 10 ANOS

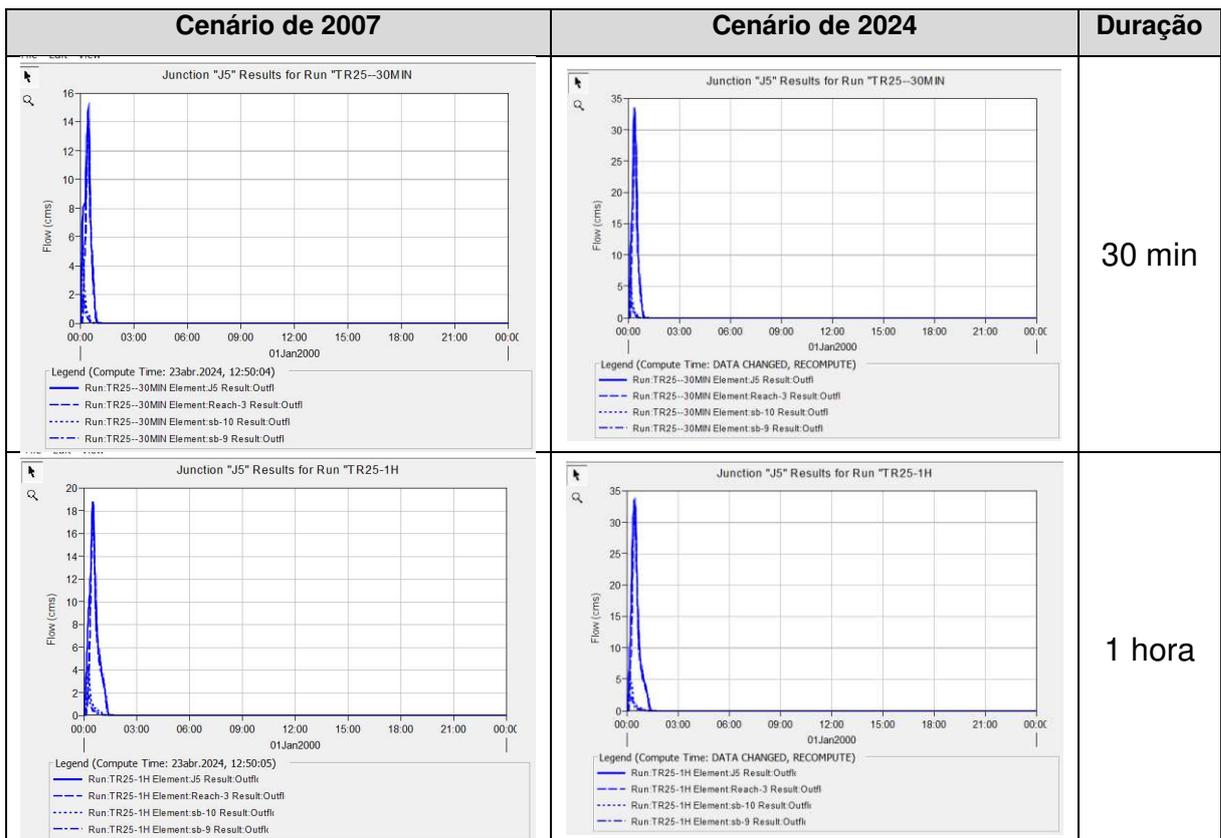
Cenário de 2007	Cenário de 2024	Duração
<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-30MIN"</p>  <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:01)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-30MIN Element J5 Result Outfl Run TR10-30MIN Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-30MIN Element sb-10 Result Outfl Run TR10-30MIN Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-30MIN"</p>  <p>Legend (Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-30MIN Element J5 Result Outfl Run TR10-30MIN Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-30MIN Element sb-10 Result Outfl Run TR10-30MIN Element sb-9 Result Outfl 	30 min
<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-1H"</p>  <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:02)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-1H Element J5 Result Outfl Run TR10-1H Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-1H Element sb-10 Result Outfl Run TR10-1H Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-1H"</p>  <p>Legend (Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-1H Element J5 Result Outfl Run TR10-1H Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-1H Element sb-10 Result Outfl Run TR10-1H Element sb-9 Result Outfl 	1 hora
<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-1,5H"</p>  <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:03)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-1.5H Element J5 Result Outfl Run TR10-1.5H Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-1.5H Element sb-10 Result Outfl Run TR10-1.5H Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR10-1,5H"</p>  <p>Legend (Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR10-1.5H Element J5 Result Outfl Run TR10-1.5H Element Reach-3 Result Outfl Run TR10-1.5H Element sb-10 Result Outfl Run TR10-1.5H Element sb-9 Result Outfl 	1,5 hora

C.1 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 10 ANOS

(Continuação)

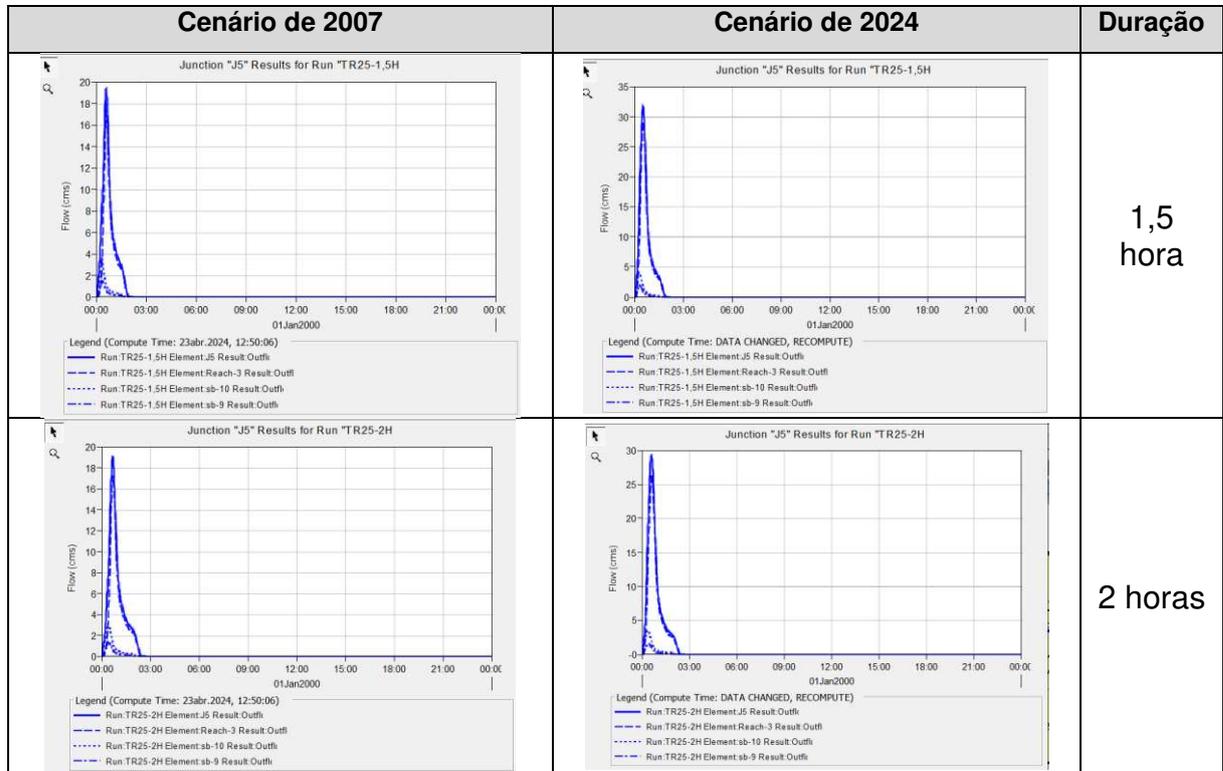


C.2 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 25 ANOS

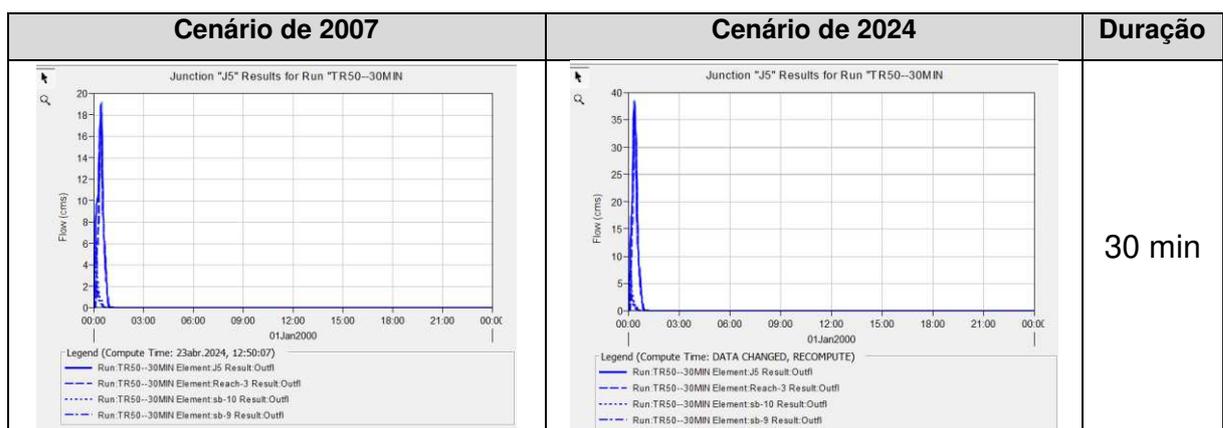


C.2 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 25 ANOS

(Continuação)



C.3 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 50 ANOS



C.3 HIDROGRAMAS PARA O TR DE 50 ANOS

(Continuação)

Cenário de 2007	Cenário de 2024	Duração
<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-1H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:08)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-1H Element J5 Result Outfl Run TR50-1H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-1H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-1H Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-1H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-1H Element J5 Result Outfl Run TR50-1H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-1H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-1H Element sb-9 Result Outfl 	1 hora
<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-1,5H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:09)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-1,5H Element J5 Result Outfl Run TR50-1,5H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-1,5H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-1,5H Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-1,5H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: 18jun.2024, 08:51:27)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-1,5H Element J5 Result Outfl Run TR50-1,5H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-1,5H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-1,5H Element sb-9 Result Outfl 	1,5 hora
<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-2H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: 23abr.2024, 12:50:10)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-2H Element J5 Result Outfl Run TR50-2H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-2H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-2H Element sb-9 Result Outfl 	<p>Junction "J5" Results for Run "TR50-2H"</p> <p>Flow (cms)</p> <p>Legend (Compute Time: 18jun.2024, 08:51:28)</p> <ul style="list-style-type: none"> Run TR50-2H Element J5 Result Outfl Run TR50-2H Element Reach-3 Result Outfl Run TR50-2H Element sb-10 Result Outfl Run TR50-2H Element sb-9 Result Outfl 	2 horas

C.4 VAZÕES DE PICO PARA CADA TEMPO DE RETORNO E DURAÇÃO

Duração	Vazões de escoamento superficial em m ³ /s					
	Cenário de 2007			Cenário de 2024		
	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos
30 min	10,60	14,90	19,00	27,80	33,50	38,40
1 hora	13,80	18,80	23,50	27,80	33,60	38,80
1,5 hora	14,50	19,50	24,00	26,00	31,60	36,70
2 horas	14,40	19,10	23,50	24,20	29,40	34,10

C.5 VOLUMES PARA CADA TEMPO DE RETORNO E DURAÇÃO

Duração	Volumes em 1.000 m ³					
	Cenário de 2007			Cenário de 2024		
	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos	TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos
30 min	16,30	21,80	27,00	34,80	42,10	48,60
1 hora	26,50	38,96	42,50	48,10	58,20	67,10
1,5 hora	33,70	43,80	53,00	63,58	68,60	79,10
2 horas	39,30	50,80	61,20	63,50	76,60	88,30