



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

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO AS MELHORES PRÁTICAS DE
GESTÃO PARA CONTROLE DE ÁGUA DE CHUVA EM UMA SUB-BACIA DO
CÓRREGO VILARINHO EM BELO HORIZONTE - MG

MATHEUS PIRES CORRÊA

BELO HORIZONTE

2018

MATHEUS PIRES CORRÊA

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO AS MELHORES PRÁTICAS DE
GESTÃO PARA CONTROLE DE ÁGUA DE CHUVA EM UMA SUB-BACIA DO
CÓRREGO VILARINHO EM BELO HORIZONTE - MG

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

Orientador: Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha

BELO HORIZONTE

2018

CORREA, Matheus Pires.

S---

Simulação Hidrológica Utilizando As Melhores Práticas De Gestão Para Controle De Água De Chuva Em Uma Sub-Bacia Do Córrego Vilarinho Em Belo Horizonte – MG / Matheus Pires Correa - 2018.

78 f. : il. ; -- cm.

Orientador: Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia Ambiental e Sanitária, 2018.

1. Melhores práticas de gestão. 2. Simulação hidrológica. 3. SWWM. I. CORREA, Matheus Pires. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Simulação Hidrológica Utilizando As Melhores Práticas De Gestão Para Controle De Água De Chuva Em Uma Sub-Bacia Do Córrego Vilarinho Em Belo Horizonte – MG.

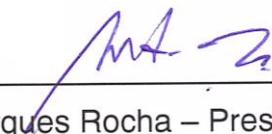
MATHEUS PIRES CORRÊA

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO AS MELHORES PRÁTICAS DE
GESTÃO PARA CONTROLE DE ÁGUA DE CHUVA EM UMA SUB-BACIA DO
CÓRREGO VILARINHO EM BELO HORIZONTE – MG

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

Data de aprovação: 28 / 11 / 2018

Banca Examinadora:



André Luiz Marques Rocha – Presidente da Banca Examinadora
Prof. MSc. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador



Luciana Peixoto Amaral
Prof^a. DSc. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Frederico Keizo Odan
Prof. DSc. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar o meu caminho durante toda esta caminhada.

À minha família, pelo empenho incansável em proporcionar tudo para que eu chegasse até aqui.

Ao meu grande amigo Wallace Gomes pelas inúmeras ajudas com o SWWM.

À Débora Dutra, por toda a ajuda com os arquivos de geoprocessamento e elaboração de mapas deste trabalho.

Aos amigos do CEFET, por proporcionarem momentos de descontração e descanso, em meio aos momentos difíceis e de pressão.

A todos os professores que tive a honra de ser aluno. Obrigado por transmitirem uma das maiores virtudes que se pode ter: o conhecimento. Sem todos vocês, este trabalho não existiria.

Ao meu orientador, Prof. André Luiz Marques Rocha, que sabiamente me orientou para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pela dedicação e atenção.

RESUMO

CORREA, Matheus Pires. Simulação Hidrológica Utilizando As Melhores Práticas De Gestão Para Controle De Água De Chuva Em Uma Sub-Bacia Do Córrego Vilarinho Em Belo Horizonte – MG. 2018. 72 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

O acentuado processo de urbanização, principalmente em regiões metropolitanas, impactou significativamente a infraestrutura urbana, especialmente em relação à drenagem de águas pluviais. Essa modificação no espaço natural causa uma alteração no ciclo hidrológico, uma vez que reduz a infiltração da água, além de favorecer a poluição ao carrear diversas substâncias, comprometendo a qualidade e diminuindo a recarga dos reservatórios subterrâneos. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi comparar dois diferentes cenários de gestão da água pluvial em uma sub-bacia do Córrego do Vilarinho, localizado na Região Venda Nova de Belo Horizonte, incluindo técnicas compensatórias de melhores práticas de gestão. Utilizou-se o modelo hidrológico SWWM (*Storm Water Management Model*) para simular técnicas estruturais na área de estudo, com a implantação de um jardim de chuva, uma trincheira de infiltração e barris de chuva residenciais. Todas as características físicas das sub-bacias de estudo foram determinadas por meio de dados geoespaciais, com utilização dos softwares ESRI ArcGIS e Google Earth. Os resultados mostraram que o jardim de chuva foi capaz de reduzir em cerca de 12%, tanto o volume escoado, quanto a vazão de pico da sub-bacia em que o mesmo foi alocado, para chuvas com período de retorno de 2, 5 e 10 anos. Já a trincheira de infiltração foi capaz de aumentar em aproximadamente 27% o volume infiltrado na sub-bacia 2, além de reduzir o escoamento e a vazão de pico em cerca de 7%, para todos os tempos de retorno da precipitação. Não foram obtidos resultados satisfatórios para os barris de chuva propostos, apenas uma redução de cerca de 0,5% no volume de escoamento. Conclui-se, portanto, que as práticas propostas são importantes técnicas de controle na fonte e que podem gerar resultados satisfatórios na busca de uma solução conjunta para os problemas das enchentes e inundações em grandes centros urbanos.

Palavras-Chave: Técnicas compensatórias. Água pluvial. Simulação hidrológica. SWWM.

ABSTRACT

CORREA, Matheus Pires. Hydrological simulation applying the Best Management Practices (BMP) for controlling stormwater in a sub-basin of Vilarinho Stream in Belo Horizonte – MG. 2018. 72 f. 2018. Monograph (Graduate) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

The urbanization process, especially in metropolitan areas, has had a significant impact on urban infrastructure, especially in relation to stormwater drainage. This type of modification in the natural space causes a change in the natural hydrological cycle because it reduces the infiltration of water, besides enhance the pollution when carrying diverse substances, compromising the quality and reducing the recharge of the water table. In this context, the objective of this work was to compare two different scenarios of stormwater management in a sub-basin of the Córrego do Vilarinho, located in the Venda Nova Region of Belo Horizonte, including the best management practices. The SWWM (*Storm Water Management Model*) hydrological model was used to simulate structural changes in the study area, evaluating the effects of a rain garden, an infiltration trench and residential rain barrels. All physical characteristics of the sub-basins were determined using geospatial data inside both ESRI ArcGIS and Google Earth software. The results showed that the rain garden was able to reduce by 12%, both the runoff and the peak flow of the sub-basin where it was allocated, for rains of 2, 5 and 10 years. The infiltration trench was able to increase by approximately 27% the infiltration in sub-basin 2, in addition to reduce runoff and peak flow by about 7%, for all precipitation return periods. Satisfactory results were not obtained for the proposed rain barrels, just a decreasing of 0.5% in the runoff volume. In summary, the proposed *BMP's* are an important source control techniques and generate satisfactory results in the search of an integrated solution to the problems of floods and inundations in urban areas.

Keywords: Best Management Practices. Stormwater. Hydrological simulation. SWWM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um sistema de drenagem urbana clássico.....	17
Figura 2 - Os quatro pilares dos SUDS.	19
Figura 3 - Sistema de drenagem urbana sustentável.....	20
Figura 4 - Experimentos da EP-USP com revestimentos permeáveis.....	24
Figura 5 - A. Bacia de detenção a céu aberto B. Bacia de detenção subterrânea. ...	25
Figura 6 - Bacia de retenção no cemitério da Vila Formosa, em São Paulo.	25
Figura 7 - Vista em corte de uma trincheira de infiltração.	26
Figura 8 - Jardim de chuva próximo a uma residência.	27
Figura 9 - Barril de chuva.	28
Figura 10 - Efeitos da urbanização em centros urbanos.	30
Figura 11 - Hidrogramas de bacias rurais e urbanizadas.	30
Figura 12 - Traçados propostos na criação de Belo Horizonte.....	32
Figura 13 - Tela inicial do SWWM 5.1	38
Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo.....	39
Figura 15 - Mancha de inundação na regional Venda Nova.....	40
Figura 16 - Dispositivos de drenagem na área de estudo	42
Figura 17 - Fluxograma das etapas de atividades no SWWM.....	45
Figura 18 – Representação dos elementos adicionados no SWWM 5.1 e sub-bacias de estudo.....	46
Figura 19 - Locais de aplicação das <i>BMP's</i>	53
Figura 20 - Hietograma de chuva de 2 anos e hidrograma do sistema - cenário 1 ...	60
Figura 21 - Hietograma de chuva de 5 anos e hidrograma do sistema - cenário 1 ...	60
Figura 22 - Hietograma de chuva de 10 anos e hidrograma do sistema - cenário 1 ...	61
Figura B1 - Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2.....	74
Figura B2 - Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2.....	74
Figura B3 - Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2.....	75
Figura B4 - Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2.....	75
Figura B5 - Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2.....	76
Figura B6 - Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2.....	76
Figura B7 - Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2.....	77
Figura B8 - Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2.....	77
Figura B9 - Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de ocupação e seus períodos de retorno correspondentes	35
Tabela 2: Características físicas da área de estudo.....	43
Tabela 3: Parâmetros de entrada para as sub-bacias no SWWM.....	47
Tabela 4: Parâmetros de entrada para infiltração no SWWM	49
Tabela 5: BMP's adotadas no Cenário 2 de modelagem	52
Tabela 6: Parâmetros de entrada para jardim de chuva.....	54
Tabela 7: Parâmetros de dimensionamento do jardim de chuva.....	55
Tabela 8: Parâmetros de entrada para a trincheira de infiltração.....	55
Tabela 9: Parâmetros de dimensionamento da trincheira de infiltração	56
Tabela 10: Parâmetros de dimensionamento do barril de chuva.	57
Tabela 11: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 2 anos	59
Tabela 12: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 5 anos	59
Tabela 13: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 10 anos	59
Tabela 14: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 2 anos	62
Tabela 15: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 5 anos	62
Tabela 16: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 10 anos	62
Tabela 17: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 2 anos..	63
Tabela 18: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 5 anos..	63
Tabela 19: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 10 anos	63
Tabela A1: Distribuição temporal para um período de retorno de 2 anos.....	72
Tabela A2: Distribuição temporal para um período de retorno de 5 anos.....	72
Tabela A3: Distribuição temporal para um período de retorno de 10 nos.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCE – *American Society of Civil Engineers*
BMP'S – *Best Management Practices*
CFR – *Code of Federal Regulations*
CIRIA – *Construction Industry Research and Information Association*
CWA – *Clean Water Act*
DEP – *Department of Environmental Protection*
DGAU – *Diretoria de Gestão de Águas Urbanas*
DRENURBS - *Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento de Belo Horizonte*
EPA – *Environmental Protection Agency*
GESIA – *Gerência de Sistema e Informações Ambientais*
HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System*
LID – *Low Impact Development*
LIUDD – *Low Impact Urban Design and Development*
MDE – *Modelo Digital de Elevação*
NCDENR – *North Carolina Department of Environmental Resources*
NPDES – *National Pollutant Discharge Elimination System*
PLANURBS - *Plano de Urbanização e Saneamento Básico de Belo Horizonte*
RMBH – *Região Metropolitana de Belo Horizonte*
SCS – *Soil Conservation Service*
SIG – *Sistema de Informação Geográfica*
SMMA – *Secretaria Municipal de Meio Ambiente*
SMOBI – *Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura*
SUDECAP - *Superintendência de Desenvolvimento da Capital*
SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems*
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
SWMM – *Stormwater Management Model*
USDA – *United States Department of Agriculture*
USGS – *United States Geological Survey*
WSUD – *Sustainable Urban Drainage Systems*
WQA – *Water Quality Act*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Definição do Problema	13
1.2	Motivação	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	O histórico da drenagem urbana no mundo	16
3.2	Sistemas de drenagem urbana sustentável	18
3.2.1	Best Management Practices.....	20
3.2.1.1	Técnicas não-estruturais	21
3.2.1.2	Técnicas estruturais	23
3.3	Os impactos da urbanização brasileira no ciclo hidrológico	29
3.4	A drenagem urbana em Belo Horizonte	31
3.5	Parâmetros Hidrológicos na Drenagem Urbana	33
3.5.1	Hietograma de projeto e o Método de Blocos Alternados	34
3.5.2	Risco hidrológico e período de retorno.....	35
3.6	O modelo hidrológico SWMM.....	36
4	METODOLOGIA.....	39
4.1	Área de estudo	39
4.2	Digitalização da área de estudo	41
4.3	Características físicas da área	43
4.4	Modelagem Hidrológica no SWMM.....	45
4.4.1	Entrada dos dados no modelo SWMM.....	46
4.4.1.1	Dados de entrada das sub-bacias (subcatchments).....	47
4.4.1.2	Dados de infiltração.....	49

4.4.1.3 Dados hidráulicos dos exutório e canal de macrodrenagem	50
4.4.1.4 Dados pluviométricos	50
4.4.1.5 Dados de entrada das BMP's	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Cenário 1	59
5.2 Cenário 2	61
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	65
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE PRECIPITAÇÃO	72
APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE VAZÕES DE ESCOAMENTO	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

Desde os primórdios da humanidade, a água é um recurso natural indispensável para a vida. A proximidade de cursos d'água era requisito fundamental para as primeiras aglomerações urbanas, visto que o bem saciava a sede das pessoas e animais, irrigava as plantações, possibilitava a pesca e navegação e ainda possuía função higienista, efetuando o transporte de dejetos para longe (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2011).

Hoje, porém, a proximidade de um curso d'água de um aglomerado urbano é visto como risco iminente de inundações, que causam prejuízos econômicos, ambientais e sociais. Em toda a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), por exemplo, são inúmeras as enchentes que se repetem anualmente em pontos já conhecidos. Segundo Champs (2012), no período de 1928 a 2000, cerca de 200 inundações de significativa importância atingiram Belo Horizonte, podendo ser caracterizadas como inundações históricas, uma vez que provocaram prejuízos econômicos e, em alguns casos, perdas de vidas humanas.

O acentuado processo de urbanização, principalmente em polos regionais de crescimento, como a RMBH, impactou significativamente a infraestrutura urbana, especialmente em relação à drenagem de águas pluviais. A causa desses impactos se deve à modificação da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, desmatamento da vegetação, ocupação desordenada, aumento de volume dos resíduos sólidos, retificação e canalização de rios e córregos, entre outras intervenções humanas. Essa modificação no espaço natural causa uma alteração no ciclo hidrológico natural, uma vez que reduz a infiltração da água, além de favorecer a poluição ao carrear diversas substâncias, comprometendo a qualidade e diminuindo a recarga dos reservatórios subterrâneos (LUCAS *et al.*, 2015).

Diante desta situação, CANHOLI (2015) destaca a necessidade de se elaborar novos conceitos em técnicas construtivas, apresentando uma conceituação geral para um planejamento de drenagem pluvial. TUCCI *et al.* (2005) explica que é fundamental que em países em desenvolvimento, o conceito de drenagem urbana sustentável passe da esfera de investigação para a da regulamentação, assegurando assim melhorias no equilíbrio entre o meio ambiente e população. Esta regulamentação deve

ocorrer nos Planos Diretores de Drenagem Urbana, onde devem ser propostas as técnicas compensatórias de drenagem urbana sustentável.

As técnicas compensatórias fazem parte das chamadas Melhores Práticas de Gestão, ou *BMP's (Best Management Practices)*, como são conhecidas nos Estados Unidos. Estas técnicas já são amplamente utilizadas em países desenvolvidos e são também conhecidas como "*Low Impact Development - LID*", "*Water Sensitive Urban Design - WSUD*"; "*Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS*" (mais usado no Reino Unido), "*Innovative Stormwater Management*" (mais usado no Canadá) ou "*techniques alternatives*" termo mais utilizado na França (BARBOSA, FERNANDES e DAVID, 2012).

Antes, porém, da construção e/ou aplicação das melhores práticas de gestão, é possível e necessário prever ou aproximar os efeitos causados pelas mesmas. Para isso, são utilizados os modelos hidrológicos de chuva-vazão, como por exemplo, o Modelo de Gestão de Água de Chuva (*Storm Water Management Model - SWMM*), modelo mais voltado para áreas urbanas, e o Sistema de Modelagem Hidrológica (*Hydrologic Modeling System - HEC-HMS*), mais utilizado para áreas rurais. Com o auxílio de softwares hidrológicos, é possível realizar uma análise da eficiência de diversas técnicas, que combinadas a uma análise econômica-ambiental podem ser determinantes para a escolha e conseqüente adoção das mesmas (TOMINAGA, 2013).

1.2 Motivação

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está sendo desenvolvido a partir da ideia de um projeto realizado durante a disciplina "Córregos Urbanos e Manejo de Águas Pluviais", cursada pelo autor na Temple University, localizada na Filadélfia, EUA. Neste projeto, utilizou-se o software *Storm Water Management Model (SWMM)* para realizar uma modelagem hidrológica em uma pequena área, avaliando a eficiência da adoção de diversas *BMP's*. O resultado positivo obtido motivou a elaboração deste trabalho, que tem como propósito propagar estas técnicas pouco aplicadas no Brasil e promover mais base teórica para a continuidade de projetos semelhantes, a níveis maiores de abrangência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar dois diferentes cenários de gestão da água pluvial em uma sub-bacia do Córrego do Vilarinho, localizado na Região Venda Nova de Belo Horizonte, por meio de uma modelagem hidrológica incluindo técnicas compensatórias de melhores práticas de gestão, ou *BMP's – Best Management Practices*.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar o conceito de *BMP (Best Management Practices)*.
- Utilizar o modelo hidrológico *Storm Water Management Model (SWWM)* para prever os efeitos da instalação das técnicas apresentadas.
- Avaliar a eficiência das *BMP's* com base em uma análise técnica e ambiental.
- Propor e estimular a adoção das *BMP's* escolhidas na área de estudo, a partir da comprovação de sua eficiência.

3 ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O histórico da drenagem urbana no mundo

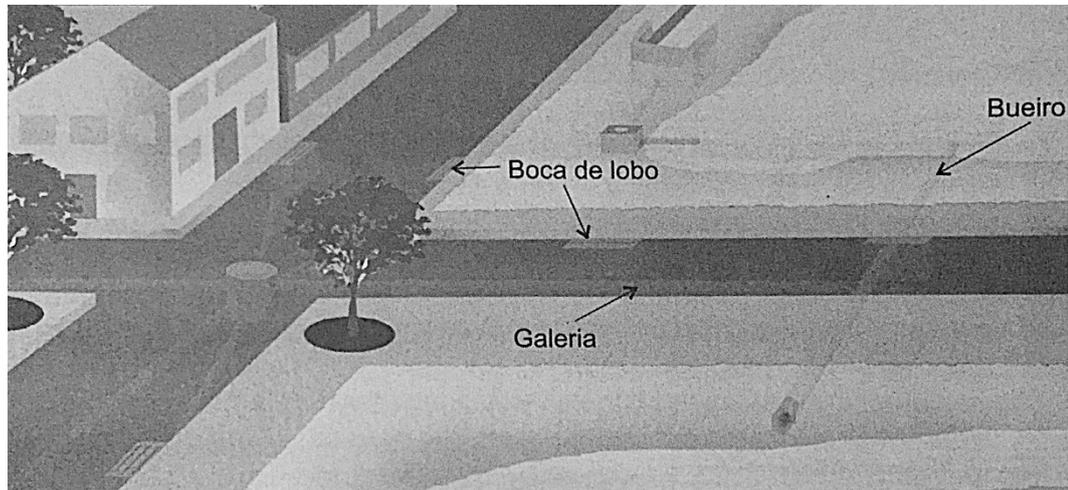
Desde a antiguidade, os sistemas de drenagem pluvial têm sido utilizados, mesmo não sendo considerados naquela época infraestruturas necessárias e condicionantes ao desenvolvimento e ordenamento dos núcleos urbanos. Datam de 3000 A.C. os coletores principais e drenos desenvolvidos pela Civilização Hindu, de 2500 A.C. sarjetas e estruturas de saneamento da Civilização Mesopotâmica e de 600 A.C. um engenhoso sistema de drenagem adaptado pela Civilização Etrusca. (MATOS, 2003). Deve-se destacar também, o sistema de esgotamento sanitário chamado de “Cloaca Máxima” em Roma, a primeira obra de grande dimensão direcionada para escoamento de esgoto e águas pluviais que ainda está em funcionamento (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD 2011).

Entretanto, ainda segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), devido à falta de conhecimento, as aglomerações urbanas medievais dividiam espaço com os esgotos expostos no sistema viário. A partir disso, foi criado o termo “cidades pútridas”, que evidenciava as condições de vida insalubres e desagradáveis da população. Essa situação, atrelada à crescente urbanização nas cidades europeias a partir do século XIX, culminou em grandes epidemias de cólera e tifo. Começou-se então a relacionar as precárias condições sanitárias das cidades às doenças que assolavam milhares de pessoas, surgindo assim o conceito de drenagem sanitária e higienista. O princípio desta visão era “expulsar” o mais rápido possível as águas das cidades, indiferente de serem águas pluviais ou com detritos, com o objetivo de sanar os problemas relacionados às doenças de veiculação hídrica. Ou seja, a drenagem pluvial como ação pública não evoluiu em decorrência da modernização de práticas de engenharia em busca do conforto, mas sim de uma recomendação de profilaxia médica (POLETO, 2011).

Os sistemas clássicos de drenagem pluvial, utilizados com o propósito de aumentar a velocidade de escoamento da água para expulsar as águas das cidades o mais rápido possível, são compostos basicamente de dispositivos de microdrenagem e macrodrenagem. Entende-se por microdrenagem os dispositivos de coleta e transporte da água pluvial para seu destino final, compreendendo as guias e sarjetas, bocas-de-lobo, redes de condutos de águas pluviais e canais de pequenas dimensões. A água, então, deságua no sistema de macrodrenagem, composto por

canais abertos ou galerias subterrâneas de grandes dimensões (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2011). A Figura 1 ilustra o sistema clássico de drenagem urbana.

Figura 1 - Esquema de um sistema de drenagem urbana clássico.



Fonte: Baptista, Nascimento e Barraud (2011).

O que não se previa, no entanto, com esse conceito sanitário-higienista era o impacto provocado a jusante, uma vez que as ações eram tomadas apenas localmente, no sentido de transferir o problema para outras regiões. Surgiram assim, juntamente à impermeabilização do solo e ao aumento da velocidade de escoamento, os constantes problemas de inundações e deslizamentos de terra atingindo as populações a jusante das cidades (POLETO, 2011).

Diante disso, com o avanço da tecnologia e das preocupações ambientais nos países desenvolvidos, passou-se a perceber o confronto que estava havendo entre a drenagem urbana clássica e o meio ambiente. Surgia assim, a partir da década de 70, um conceito mais evoluído de drenagem, que além da saúde pública, contava com a preocupação ambiental. Este conceito englobava novas “tecnologias alternativas ou compensatórias”, que segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), “buscavam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos”.

Essa nova Drenagem Urbana, chamada de Sustentável, segundo Jones e MacDonald (2007), desconstruiu completamente o princípio de rápido escoamento. Pelo contrário, esses novos sistemas de controle de fluxo na fonte visam a diminuição da velocidade e do volume de escoamento através de uma maior taxa de infiltração.

Estes sistemas, porém, ainda não figuram entre a maioria das cidades brasileiras, enquanto países como Austrália, EUA e Canadá já priorizam que o comportamento das águas pluviais seja aproximado ao máximo às condições naturais prévias à ocupação antrópica. Estas abordagens sustentáveis são conhecidas também como Low Impact Development (LID), nos EUA e Canadá; Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), no Reino Unido; Water Sensitive Urban Design (WSUD), na Austrália; e Low Impact Urban Design and Development (LIUDD), na Nova Zelândia (POLETO, 2011). No Brasil, popularizou-se apenas o termo “técnicas compensatórias”.

Surge também, nos EUA, a denominação *Best Management Practices*, ou somente BMP, que em tradução livre, são as melhores práticas de manejo das águas pluviais.

3.2 Sistemas de drenagem urbana sustentável

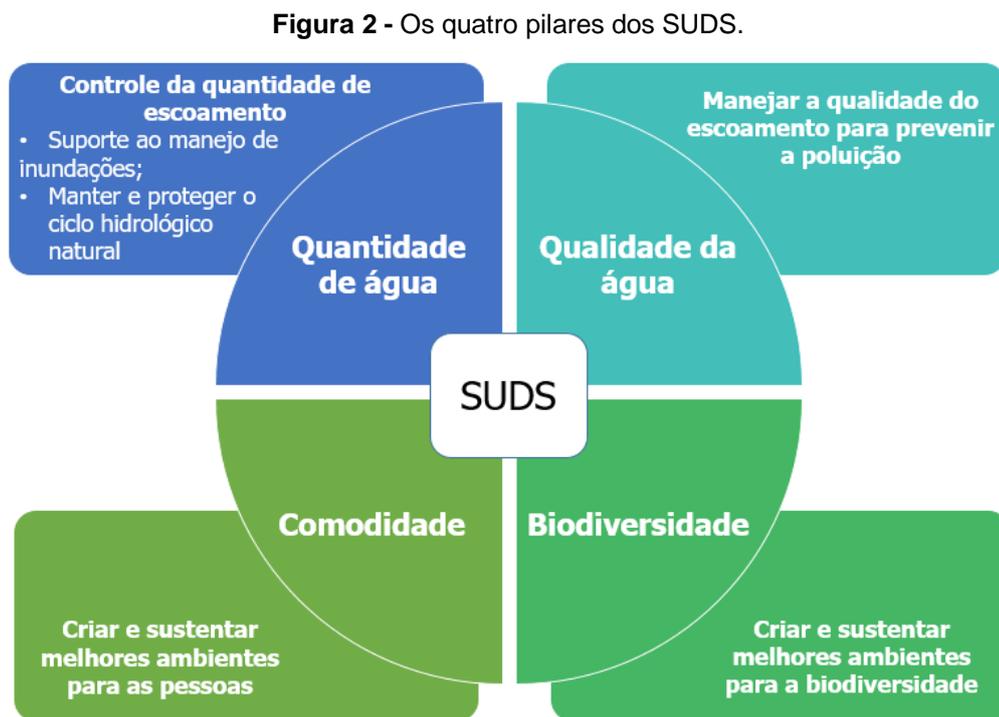
Devido à iminente necessidade de incorporar conceitos em várias áreas da engenharia que atuem em maior harmonia com o meio ambiente, as concepções convencionais de drenagem urbana têm passado por um processo de revisão em países desenvolvidos e em desenvolvimento (CANHOLI, 2013). O conceito de drenagem sustentável aparece neste cenário, visando possibilitar uma abordagem sistêmica do problema, com o objetivo principal de regenerar o ciclo hidrológico natural.

O termo Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), mais utilizado no Reino Unido, expressa o mesmo conceito que Low Impact Development (LID), mais utilizado nos EUA, ou Water Sensitive Urban Design (WSUD), comumente utilizado na Austrália. De acordo com Canholi (2013), as técnicas baseadas nestes termos buscam o desenvolvimento de controles difusos no ambiente antropizado. Os SUDS são um conjunto de técnicas sustentáveis de controle e gestão das águas pluviais (LOURENÇO, 2014). De acordo com o Manual de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) (WOODS-BALLARD *et al.*, 2015), os quatro pilares dos SUDS são:

- Controlar a quantidade de escoamento pluvial, auxiliando na gestão de inundações e aproximando o ciclo hidrológico ao seu natural;

- Gerenciar a qualidade da água pluvial com o intuito de diminuir o impacto sobre a poluição dos cursos d'água;
- Promover o bem-estar do ambiente para as pessoas; e
- Promover o bem-estar do ambiente para a biodiversidade.

A Figura 2 representa os objetivos principais dos SUDS.

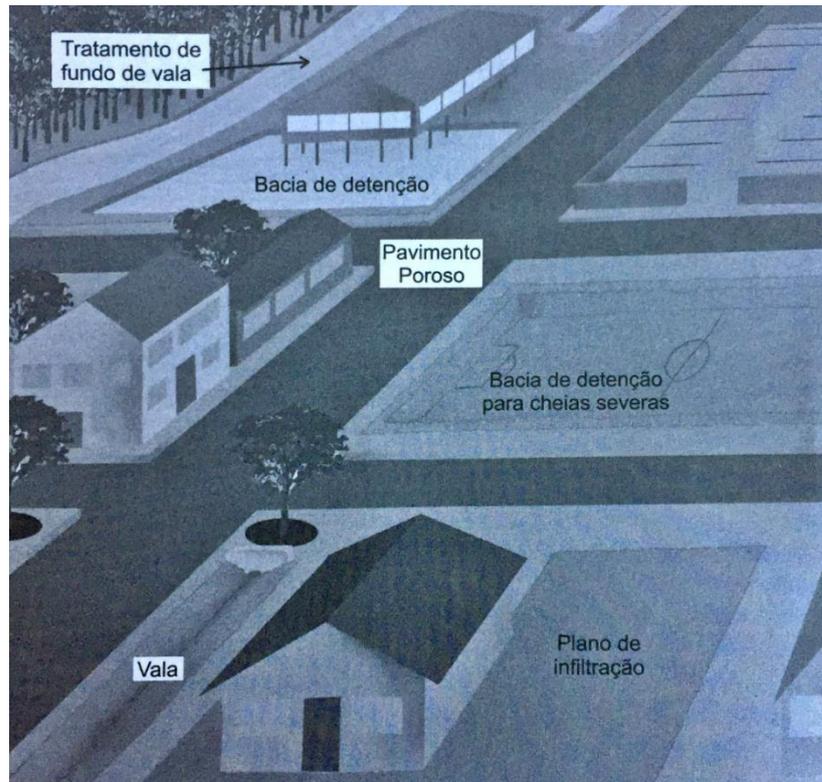


Fonte: Adaptado de Manual de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) (WOODS-BALLARD *et al.*, 2015)

Ao contrário dos conceitos convencionais, baseados no aumento da velocidade de escoamento das águas pluviais através de um sistema de coletores enterrados ou não, a drenagem sustentável visa a um controle do escoamento da água de chuva próximo ao local onde ela cai (na fonte). Com isso, pretende-se diminuir a velocidade e o fluxo do escoamento além de se reduzir as vazões de pico, através da infiltração do excesso de água no subsolo, da evaporação e evapotranspiração e do armazenamento temporário, que possibilita o reuso ou sua lenta liberação, após a precipitação (LOURENÇO, 2014).

A Figura 3 exemplifica um sistema alternativo de drenagem urbana, considerado sustentável.

Figura 3 - Sistema de drenagem urbana sustentável.



Fonte: BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD (2011).

3.2.1 Best Management Practices

Segundo Ribeiro (2014), o termo *Stormwater Best Management Practices* (Melhores práticas de gestão de águas de chuva) foi primeiramente utilizado no “*Clean Water Act*” (CWA), elaborado pelo governo norte-americano em 1972, mas só foi definido em 1987 com o surgimento do “*Water Quality Act*” (WQA), uma versão mais atualizada do CWA. O termo passa a ter maior relevância ao ser definido pela EPA (*Environmental Protection Agency* – Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana) no *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES). A EPA (1993) define BMP como:

...atividades programadas, proibição de práticas, procedimentos de manutenção e outras práticas de gestão para prevenir ou reduzir a poluição das águas dos Estados Unidos; *BMP's* também incluem requerimentos para o tratamento, procedimentos de operação e práticas de controle de escoamento local, vazamentos, disposição de lodo ou efluentes, ou drenagem de substâncias poluentes armazenadas. *BMP's* significam “melhores práticas de gestão” (40 CFR § 122.2 – Definitions).

A EPA, em 1996, em parceria com a ASCE (*American Society of Civil Engineers* – Sociedade Americana dos Engenheiros Civis), criou a *International Stormwater BMP Database* (Banco de Dados Internacional de *BMP* de Águas Pluviais), cujo endereço eletrônico disponibiliza mais de 600 estudos de *BMP's*, resultados de performance, ferramentas para uso em estudos sobre *BMP's*, guias de monitoramento e outras publicações relacionadas (RIBEIRO, 2014).

Deve-se entender que existem diferentes classificações para as *BMP's*, dependendo do órgão ambiental de cada estado norte-americano, uma vez que cada estado possui suas leis próprias. O Banco de Dados Internacional de *BMP*, assim como a Agência Ambiental do Estado da Carolina do Norte (NCDENR – *North Carolina Department of Environmental Natural Resources*) e do Estado da Pensilvânia (DEP – *Department of Environmental Protection*), dividem as *BMP's* em técnicas estruturais e técnicas não-estruturais. Todas as técnicas explanadas a seguir são referidas no *Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual*, desenvolvido pelo DEP em dezembro de 2006.

Para cada *BMP* apresentada no manual, são apresentados pontos chave para a adoção da mesma, seus locais de aplicação (residencial, comercial, industrial, urbano, estradas e vias), suas funções hidráulicas (redução de volume, velocidade de escoamento, redução de vazão de pico) e suas funções na melhora da qualidade da água.

3.2.1.1 Técnicas não-estruturais

As medidas não estruturais, opostamente às estruturais, não se dedicam a projetar ou construir estruturas de controle, mas são relativas a planejamentos e programas de conscientização, prevenção e controle de emissão de poluentes. (RIBEIRO, 2014). São medidas de caráter preventivo e educativo, que envolvem mudanças de comportamento e pensamento. Por este motivo, são muitas vezes desvalorizadas e desinteressadas por gestores públicos, uma vez que seus resultados não são de curto prazo.

O Manual de *BMP's* de Águas Pluviais da Pensilvânia (2006) apresenta 6 grandes grupos principais de medidas não estruturais, que são:

- *Proteger os recursos sensíveis e de valor especial:* medidas de planejamento urbano baseadas na identificação de áreas sensíveis e sua consequente proteção. O mapeamento destas áreas sensíveis, como áreas de preservação permanente, várzeas, zonas alagadas e vias de drenagem natural, é fundamental para impossibilitar o desenvolvimento das mesmas, devido a suas funções pluviais e seus valores ambientais.
- *Aglomerar e concentrar:* mais um grupo de medidas de planejamento urbano e zoneamento inteligente. Neste caso, as técnicas visam um agrupamento de construções em menores áreas, mais concentradas e verticalizadas, com aumento de espaços abertos não alterados pelo homem e ambientes naturais.
- *Minimizar distúrbios e manutenção:* para este grupo, as medidas sugeridas visam estudar a melhor posição de construções, estradas e outras infraestruturas de modo a promover a menor remoção e alteração no solo e vegetação. Além disso, visam minimizar a compactação dos solos que geram o aumento do escoamento superficial e diminuição da infiltração. Em áreas já impactadas, se vê necessária a reabilitação das mesmas com espécies nativas, sem aplicação de químicos, fertilizantes ou herbicidas.
- *Reduzir superfícies impermeáveis:* como o próprio nome diz, estas medidas visam a menor impermeabilização do solo, através de estudos prévios de tráfego de veículos de modo a dimensionar melhor as estradas, ruas e estacionamentos. Estas medidas estão interligadas a medidas estruturais, como trincheiras de infiltração próximas a estradas ou pavimentos permeáveis.
- *Desconectar, distribuir e descentralizar:* este grupo de técnicas consistem na desconexão de estruturas convencionais com a rede de drenagem convencional. Por exemplo, redirecionar o escoamento de telhados para áreas vegetadas, como jardins e redirecionar o escoamento de estradas e vias para trincheiras de infiltração e outras áreas vegetadas.
- *Controle na fonte:* para este grupo, o foco da técnica é exclusivamente a melhora da qualidade da água pluvial, com a remoção de sólidos poluentes carregados durante o escoamento superficial. Para isso, a medida recomendada é a varrição e limpeza de vias de tráfego, de modo a reduzir o carregamento de poluentes e de obstrução do sistema de drenagem.

3.2.1.2 Técnicas estruturais

O sucesso de um SUDS é fruto da combinação de técnicas estruturais e não estruturais (LOURENÇO, 2014). As medidas estruturais dizem respeito a intervenções físicas, que podem ser de pequeno e médio porte, como obras pontuais ou lineares, ou de grande porte, como bacias de infiltração, detenção e retenção (TOMINAGA, 2013). Elas têm o objetivo de conter, reter ou melhorar a condução do escoamento, aumentando a infiltração da água no solo e melhorando sua qualidade.

São apresentadas vinte e uma estruturas no Manual de *BMP's* de Águas Pluviais da Pensilvânia (2006). A título de ilustração, foram destacadas inicialmente 5 estruturas que são mais utilizadas, das quais foram selecionadas 3 para este estudo em específico.

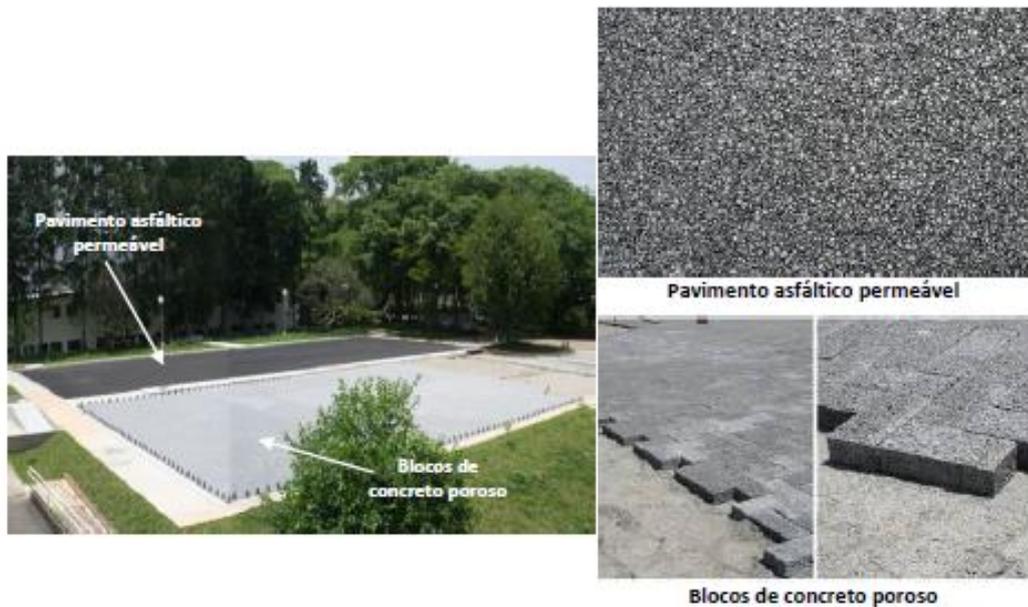
3.2.1.2.1 Pavimentos permeáveis com cama de infiltração

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), as superfícies destinadas ao sistema viário e às áreas de estacionamento ocupam cerca de 30% da área da bacia de drenagem em áreas densamente urbanizadas. Dessa forma, a impermeabilização do solo com a pavimentação tem contribuído significativamente para o aumento dos deflúvios superficiais e inundações (TOMINAGA, 2013).

Neste contexto, surgiram os pavimentos permeáveis, que consistem em uma camada superficial permeável sustentada por uma base de agregados médios e graúdos que formam uma espécie de reservatório (CANHOLI, 2013). Este reservatório permite o armazenamento temporário para o controle de vazões de pico e promove a infiltração no solo.

As camadas superficiais podem ser constituídas de asfalto ou concreto poroso, ou de calçamentos desconectados que promovem a infiltração entre suas juntas. A Figura 4 ilustra experimentos do Laboratório de Hidráulica da EP-USP utilizando diversos tipos de revestimentos permeáveis.

Figura 4 - Experimentos da EP-USP com revestimentos permeáveis.



Fonte: TOMINAGA (2013).

Como toda técnica compensatória, os pavimentos porosos apresentam diversas vantagens em relação a sistemas convencionais, porém também apresentam limitações na sua utilização. Os pavimentos permeáveis são indicados para vias de tráfego leve, pois são menos resistentes que os convencionais. Além disso, a infiltração de águas contaminadas pode levar à poluição do lençol freático (TOMINAGA, 2013).

3.2.1.2.2 Bacias de detenção e retenção

Bacias de detenção e retenção são as medidas compensatórias mais utilizadas ultimamente (CANHOLI, 2013). São estruturas adaptáveis ao nível de urbanização da bacia e à necessidade construtiva do local. Dessa forma, podem ter dimensões e formas variáveis.

De acordo com Baptista, Nascimento e Barraud (2011), as bacias de detenção são estruturas de acumulação temporária e/ou de infiltração das águas de chuva que possuem três funções principais: (i) amortecimento de cheias como forma de controle de inundações; (ii) redução do volume de escoamento superficial, no caso de bacias de infiltração e (iii) redução da poluição difusa de origem pluvial. As bacias de detenção se caracterizam por estarem secas antes dos eventos chuvosos, podendo

ser utilizadas estruturas paisagísticas de parques e praças. A Figura 5 exemplifica uma bacia de retenção a céu aberto e uma bacia subterrânea.

Figura 5 - A. Bacia de retenção a céu aberto B. Bacia de retenção subterrânea.



Fonte: MOTA *et al.* (2012).

Já as bacias de retenção geralmente apresentam espelhos d'água e possuem também função paisagística. É o caso da Lagoa da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, MG. Canholi (2013) explica que as bacias de retenção apresentam melhores resultados com relação a qualidade da água, pois o tempo de residência maior das águas promovem a sedimentação de materiais que podem ser retirados através de limpezas periódicas. Este tipo de bacia também possui uma capacidade de armazenamento para o controle dos picos de cheia, sendo o excesso lançado à jusante através de extravasores. A figura 6 exemplifica uma bacia de retenção.

Figura 6 - Bacia de retenção no cemitério da Vila Formosa, em São Paulo.



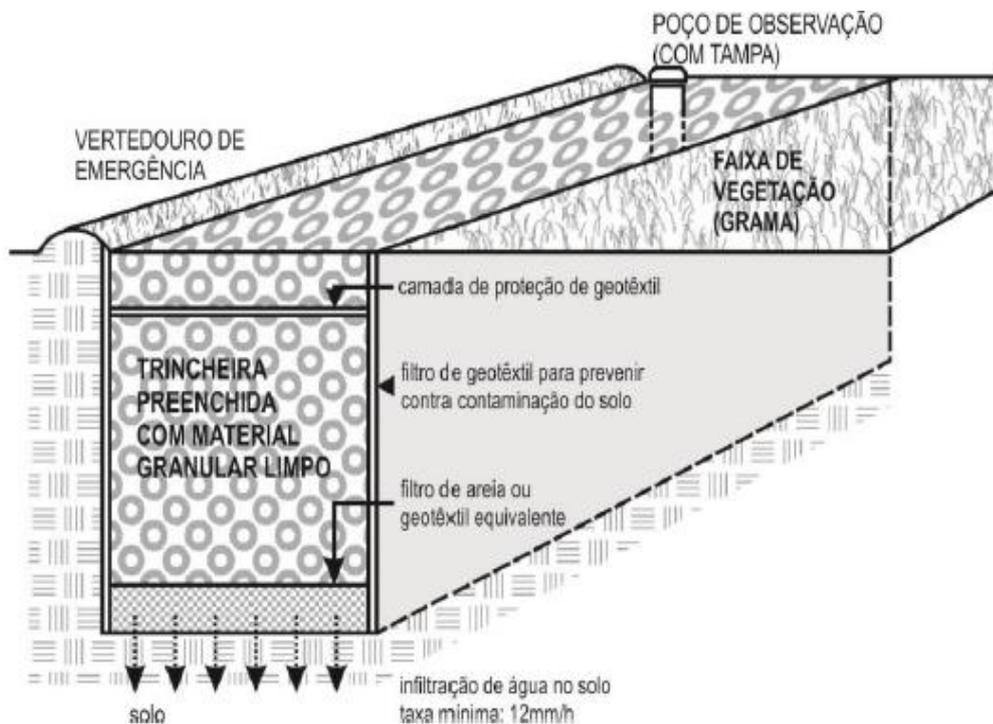
Fonte: CANHOLI (2013).

3.2.1.2.3 Trincheiras de infiltração

As trincheiras de infiltração são técnicas lineares, implantadas a baixas profundidades com a função de coletar as águas provenientes de escoamentos de áreas impermeáveis adjacentes (TOMINAGA, 2013). Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), elas podem ser utilizadas em canteiros centrais e passeios, ao longo de sistemas viários ou ainda junto a estacionamentos, terrenos esportivos ou outras áreas semelhantes.

As trincheiras são preenchidas com material poroso, principalmente brita, seixos ou pedra de mão, com porosidade superior a 30%. São revestidas com uma manta geotêxtil de interface com o solo ou um filtro de areia para promoverem um pré-tratamento da água a ser infiltrada (CANHOLI, 2013). Schueler (1978) ressalta a importância da estrutura na remoção de poluentes solúveis e particulados, porém alerta para cargas elevadas de sedimentos que podem se depositar no fundo e nos interstícios dos poros da trincheira, causando colmatção. A Figura 7 apresenta um esquema de trincheira de infiltração.

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



Fonte: TOMINAGA (2013).

3.2.1.2.4 Jardins de chuva

As estruturas de biorretenção, ou jardins de chuva são dispositivos pouco profundos que funcionam como filtros utilizando a atividade biológica (plantas e vegetação nativa) para melhorar a qualidade das águas do escoamento superficial, além de contribuir para a infiltração, retenção, evapotranspiração e atenuação dos picos de cheia (CANHOLI, 2013). Segundo Tominaga (2013), são implantados em locais adjacentes a estacionamentos, vias públicas e áreas densamente urbanizadas para captar a água através de uma canalização ou entradas construídas no meio-fio.

São estruturas funcionalmente paisagísticas, que promovem a melhoria da qualidade das águas pluviais através da retenção de sedimentos e a diminuição nos picos de vazão através da detenção temporária das águas e da infiltração. Porém possuem limitações devido à impossibilidade de utilização em grandes áreas de contribuição, por serem suscetíveis a colmatação. Além disso, o custo de construção da estrutura é comumente maior que de outras estruturas de controle (TOMINAGA, 2013). A Figura 8 ilustra um jardim de chuva localizado em Maryland, nos Estados Unidos.

Figura 8 - Jardim de chuva próximo a uma residência.



Fonte: DEP (2006).

3.2.1.2.5 Técnicas de retenção de escoamento e reuso

As técnicas de retenção de escoamentos provenientes de telhados compreendem estruturas que possibilitam o reuso da água, tais como micro reservatórios, barris de chuva e cisternas. São amplamente utilizados no mundo e no Brasil, principalmente em regiões onde há escassez hídrica durante períodos de estiagem. Podem ser instalados em qualquer tipo de ocupação: residencial, industrial ou comercial (CANHOLI, 2013).

Os dispositivos possuem a função principal de armazenamento de água da chuva e amortecimento dos picos de vazão. Como função secundária, possibilitam a reutilização da água para fins menos nobres, como lavagem de superfícies ou até irrigação (TOMINAGA, 2013). Podem ser superficiais ou enterrados e de volumes variáveis, de acordo com a necessidade, características climáticas locais e regulamentações e leis vigentes. Tominaga (2013) ainda ressalta que no município e estado de São Paulo existem leis vigentes que obrigam os empreendimentos com áreas superiores a 500m² a implantar micro reservatórios de água da chuva. A Figura 9 exemplifica um barril de chuva.

Figura 9 - Barril de chuva.



Fonte: SMGM (2015)

3.3 Os impactos da urbanização brasileira no ciclo hidrológico

A intensificação da urbanização no Brasil, desde o século passado, tem acarretado em significativas mudanças no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas brasileiras (CANHOLI, 2013). O planejamento deficiente, juntamente com planos diretores falhos ou inexistentes, fez com que o rápido crescimento das cidades não seguisse a regulamentação do uso e ocupação do solo. Essa forma inadequada de ocupação do solo é um dos principais responsáveis por alterar as dinâmicas de escoamento superficial, infiltração das águas, recarga dos aquíferos e qualidade da água nas bacias hidrográficas.

Segundo Tucci *et al.* (2015), os aglomerados urbanos provocam alterações não somente no local exato onde estão inseridos, mas também nas áreas a montante e a jusante, com efeitos em toda a bacia. As principais formas antrópicas de atuação na bacia são obras hidráulicas, urbanização, desmatamento, reflorestamento e uso agrícola (TUCCI *et al.*, 2000).

Em áreas não antropizadas, cobertas por vegetação, o escoamento é interceptado, aumentando assim a infiltração da água no solo e reduzindo sua velocidade de escoamento, evitando, dessa forma, problemas de erosão. Já nas bacias urbanizadas, a área impermeável é maior, fazendo com que a velocidade de escoamento aumente e a taxa de infiltração diminua (TUCCI *et al.*, 2000). Desta maneira, observa-se uma diminuição no tempo de concentração da bacia, ou seja, no tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia escoe até o exutório. Na Figura 10 são apresentadas diversas consequências relacionadas ao aumento da urbanização.

Figura 10 - Efeitos da urbanização em centros urbanos.

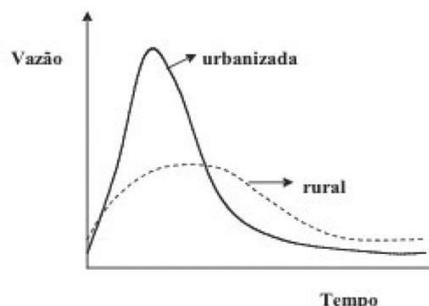


Fonte: TUCCI (1997) APUD NAKAZONE (2005).

O tempo de concentração pode ainda ser influenciado por dispositivos utilizados na drenagem convencional para canalização e condução das águas em direção os corpos d'água, como calhas, sarjetas e tubulações, assim como medidas estruturais nos próprios cursos d'água, como canais e galerias (CANHOLI, 2013). Todos estes efeitos juntos culminam em um dos mais importantes impactos sobre a sociedade: as enchentes urbanas.

Além das condições físicas da bacia, como a declividade do terreno e a cobertura vegetal, as particularidades climáticas de cada região são também essenciais na dinâmica do ciclo hidrológico. A distribuição temporal e espacial das precipitações juntamente com a impermeabilização do solo são fundamentais fatores para a ocorrência de inundações e enchentes (TUCCI, 2005). A Figura 11 mostra a relação entre os picos de vazão em áreas urbanizadas e rurais.

Figura 11 - Hidrogramas de bacias rurais e urbanizadas.



Fonte: TUCCI (2008)

Outra importante característica hidrológica afetada no processo de urbanização é a evapotranspiração. A remoção da vegetação diminui drasticamente o potencial de evapotranspiração da bacia e, conseqüentemente, seu efeito no controle da temperatura local. Segundo Canholi (2013), observa-se um aumento de até 5°C em centros urbanos e uma redução de 10% na umidade em relação a ambientes naturais.

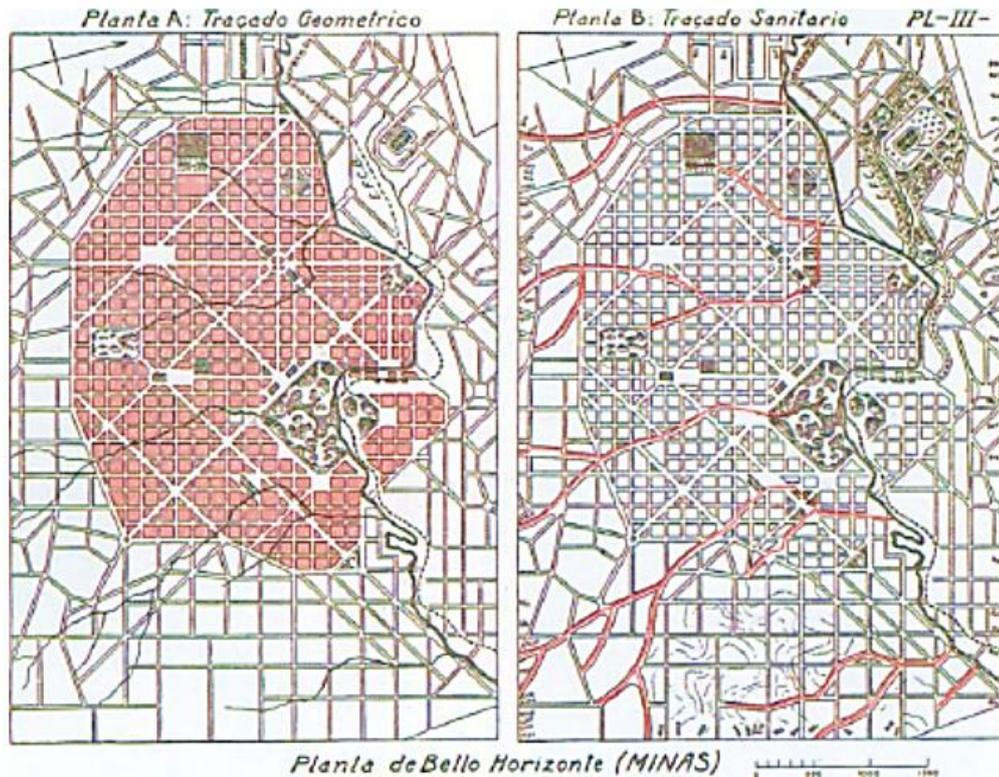
Outro fator significativamente impactado pela urbanização é a qualidade da água. Ao escoar, a água carrega diversos poluentes e resíduos sólidos presentes nas vias e caminhos, que culminam nos corpos hídricos. De acordo com Tucci *et al.* (2015), os principais poluentes encontrados no escoamento superficial urbano são: sedimentos, nutrientes, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos. De acordo com o mesmo autor, estes poluentes são advindos de quatro fontes diferentes: poluição da água por componentes do ar e que são precipitados durante as chuvas; lavagem da superfície pela chuva; arraste de sedimentos e resíduos sólidos pela chuva; e a mistura de esgoto à drenagem pluvial.

Devido ao arraste dos sedimentos, Schueler (1987) afirma que a qualidade da água pluvial é significativamente menor durante os primeiros 25 mm de chuva. Com isso, tem-se a importância de uma gestão integrada entre a coleta e limpeza urbana e a drenagem urbana (TUCCI *et al.*, 2015).

3.4 A drenagem urbana em Belo Horizonte

Em 1897, Belo Horizonte foi fundada para ser a capital do Estado de Minas Gerais. Segundo Champs *et al.* (2001), o projeto do núcleo urbano inicial foi elaborado para abranger uma população de 200 mil habitantes, basicamente envolvidos pela Avenida do Contorno. Neste projeto, liderado pelo Engenheiro Aarão Reis, a hidrografia natural não foi levada em conta no traçado urbanístico, devido à concepção de domínio da natureza predominantes naquela época. Em 1894, o Engenheiro Saturnino de Brito sugeriu um traçado alternativo, chamado de traçado sanitário, que destacava os cursos d'água e recomendava a criação de avenidas sanitárias, de cerca de 50 metros de largura e córregos abertos passando no meio (WERNECK, 2012). Este projeto, porém, foi recusado por Aarão Reis. A Figura 12 representa os dois traçados propostos.

Figura 12 - Traçados propostos na criação de Belo Horizonte.



Fonte: FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (1996) APUD CHAMPS ET AL. (2001)

Os primeiros sistemas de drenagem implantados na cidade foram baseados nos princípios higienistas predominantes na época, prevalecendo as diretrizes de evacuação rápida das águas reunidas nos sistemas unitários. Com isso, foram retificados os primeiros cursos d'água e construídos os primeiros canais, que logo se converteram em condutos de efluentes poluídos (CHAMPS *et al.*, 2001).

Em 1979, foi proposto pela Superintendência de Desenvolvimento da Capital – SUDECAP um plano de intervenções em cursos d'água chamado de PLANURBS - Plano de Urbanização e Saneamento Básico de Belo Horizonte. Neste plano, a recomendação de revestir em concreto os córregos e ribeirões localizados nas áreas urbanizadas ou destinadas à expansão urbana era colocada como última alternativa. Entretanto, nas três décadas seguintes, a Prefeitura de Belo Horizonte executou inúmeras obras de canalizações, que somadas resultaram em um investimento de mais de US\$ 1 bilhão (CHAMPS *et al.*, 2001).

Em 1996, as Leis Municipais 7.165 e 7.166 de 1996, instituíram o Plano Diretor do Município, onde se definiram as diretrizes e parâmetros para parcelamento, ocupação e uso do solo da cidade. Estas Leis foram atualizadas e alteradas pelas Leis 8.137 de 2000 e 9.959 de 2010, que estabeleceram normas e condições para a

urbanização e a regularização fundiária das Zonas de Especial Interesse Social, entre outras providências.

Entre 1999 e 2001 foi criado o Plano Diretor de Drenagem Urbana. Com esse plano, foram elaborados diagnósticos do sistema de drenagem, que embasaram o desenvolvimento de planos subsequentes para todo o contexto das águas urbanas nas bacias hidrográficas que contém o território do município (CHAMPS, 2012).

Atualmente, o município de Belo Horizonte conta com o Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento de Belo Horizonte – DRENURBS, que atua na cidade desde 2001, em progressivas fases. A concepção do programa teve como premissa o tratamento integrado de problemas sanitários e ambientais no nível da bacia hidrográfica. Segundo Mota (2012b), o DRENURBS segue as seguintes diretrizes:

- Implantação de parques e áreas de preservação permanente ao longo dos cursos d'água;
- Implantação de bacias de retenção;
- Tratamento integrado dos corpos d' água como elementos paisagísticos;
- Envolvimento das comunidades em todos os processos de decisão e promoção de ações voltadas para conscientização;
- Estímulo às atitudes de valorização dos recursos hídricos como bens indispensáveis à qualidade ambiental.

De acordo com a PBH, foram investidos nos últimos anos cerca de R\$1,14 bilhões em intervenções de combate a inundações. É estimado pela Prefeitura, porém, que ainda serão necessários cerca de R\$ 5 bilhões para solucionar todos os problemas sanitários da cidade (PBH, 2018).

3.5 Parâmetros Hidrológicos na Drenagem Urbana

Para a realização de estudos hidrológicos voltados para a drenagem pluvial, é necessário adotar modelos matemáticos do tipo chuva-vazão para definição de hidrogramas de projeto (ABREU, 2013). Hidrograma, segundo Tucci (2015), é um gráfico que relaciona a vazão e o tempo, sendo esta relação o resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico com a precipitação e a vazão da bacia

hidrográfica. Alguns valores de tempo compõem um hidrograma e são de grande importância, sendo eles:

- Tempo de retardo (t_l): intervalo de tempo entre o centro de massa da chuva (hietograma) e do hidrograma;
- Tempo de pico (t_p): intervalo entre o centro de massa da precipitação e o pico do hidrograma (quando a precipitação é mais intensa);
- Tempo de concentração (t_c): intervalo para que a precipitação no ponto mais distante da bacia atinja a seção principal, também é definido como o intervalo entre o término da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (fim do escoamento superficial);
- Tempo de ascensão (t_m): intervalo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;

3.5.1 Hietograma de projeto e o Método de Blocos Alternados

Para a determinação da precipitação de projeto, é necessário construir um hietograma que represente a distribuição temporal da precipitação. Segundo Abreu (2013), o hietograma de projeto indica a distribuição no tempo de um evento de precipitação. Esta distribuição temporal é de fundamental importância, uma vez que pode influenciar na magnitude do hidrograma de saída. Neste contexto, merecem atenção especial as precipitações intensas ou máximas, que são as principais causas de cheias e prejuízos. Uma das formas de representar as precipitações máximas é por meio de curvas de intensidade, duração e frequência (i-d-f), que relacionam a duração, a intensidade e o risco da precipitação de ser superada ou igualada (TUCCI, 2000).

Com isso, a adoção de chuvas padronizadas é um método muito utilizado para a definição de chuvas de projeto. Neste trabalho, será utilizado o Método dos Blocos Alternados para a desagregação de tormentas e composição da chuva de projeto. Neste método, a precipitação é distribuída em intervalos de tempo contidos na duração total da mesma. Assim, os incrementos acumulados de precipitação são transformados em alturas de chuva. Em seguida, os blocos obtidos são rearranjados numa sequência tal que, no centro da duração da tormenta, situe-se o bloco maior e, em seguida, os demais blocos, em ordem decrescente, uma à direita e o outro à

esquerda do bloco maior, alternadamente, formando a sequência 4-2-1-3-5, e assim por diante (TUCCI, 1995).

3.5.2 Risco hidrológico e período de retorno

Devido às características aleatórias dos eventos de chuva, para os projetos de obras que venham a ser implantados no sistema de drenagem, são adotados os conceitos de risco hidrológico e período ou tempo de retorno. Para Baptista, Nascimento e Barraud (2005), o risco adotado na concepção do projeto é definido por referência à probabilidade de ocorrência ou superação de um dado evento tomado como crítico. A escolha deste risco hidrológico resulta da pretensão a uma proteção absoluta e da preocupação de limitar, o máximo possível os custos de implantação e operação. Esta escolha nem sempre é de fácil quantificação, pois os maiores níveis de segurança estão atrelados a elevados custos de implantação (TOMINAGA, 2013). Por este motivo, são utilizados valores usuais no meio técnico em obras de drenagem. A Tabela 1 apresenta estes valores, de acordo com Porto (1995).

Tabela 1: Tipos de ocupação e seus períodos de retorno correspondentes

Sistema	Tipo de Ocupação	TR (anos)
<i>Microdrenagem</i>	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2-5
<i>Macro-drenagem</i>	Áreas residenciais e avenidas	5-10
	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	> 500

Fonte: Porto (1995)

O tempo ou período de retorno (TR) é uma variável aleatória definida como o intervalo médio de tempo decorrido entre duas ocorrências sucessivas de um dado evento ou sua superação. Conforme a tabela anterior, para este trabalho, serão utilizados os períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, uma vez que os sistemas de interesse estão ligados a rede de microdrenagem pluvial da cidade.

3.6 O modelo hidrológico SWMM

Os modelos hidrológicos de simulação são ferramentas eficientes para prever os efeitos causados às bacias hidrográficas pela urbanização e impermeabilização dos solos. Estes modelos fornecem resultados relevantes aos tomadores de decisão para realizarem um planejamento apropriado para o desenvolvimento mais sustentável das cidades (COLLODEL, 2009). Por meio destas ferramentas, é possível estimar o escoamento de bacias hidrográficas em termos de velocidade e volume e, assim, antever impactos decorrentes de diversos cenários hipotéticos (TOMINAGA, 2013).

Baseados em um sistema de equações e procedimentos compostos por parâmetros e variáveis, os modelos representam uma realidade de forma simplificada, pois não é possível levantar todos os processos naturais inerentes ao fenômeno analisado. Porém, segundo Rocha (2013), este é um dos pontos vantajosos destas ferramentas, pois simplificam a realidade e fornecem informações suficientes para dar uma resposta rápida e direta aos problemas em estudo, reduzindo riscos, custos e tempo.

Para Paiva (2001), é fundamental a existência de séries de dados hidráulicos e hidrológicos confiáveis do local em estudo para que a modelagem tenha resultados plausíveis. Por isso, o monitoramento hidrológico é um dos aspectos mais importantes na adequada caracterização dos recursos hídricos.

O *Storm Water Management Model* (SWMM) foi desenvolvido em 1971 (METCALF & EDDY, 1971) na Universidade da Flórida, sob patrocínio da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). É um modelo hidrológico chuva-vazão dinâmico, que, a partir de dados de entrada, simula hidrogramas resultantes, determinando a vazão do escoamento gerado em cada sub-bacia e a qualidade da água em cada tubulação ou canal durante o período de simulação (COLLODEL, 2009).

Segundo o Manual do Usuário do SWMM 5.1, o modelo possui diversas aplicações. Dentre elas, pode-se destacar:

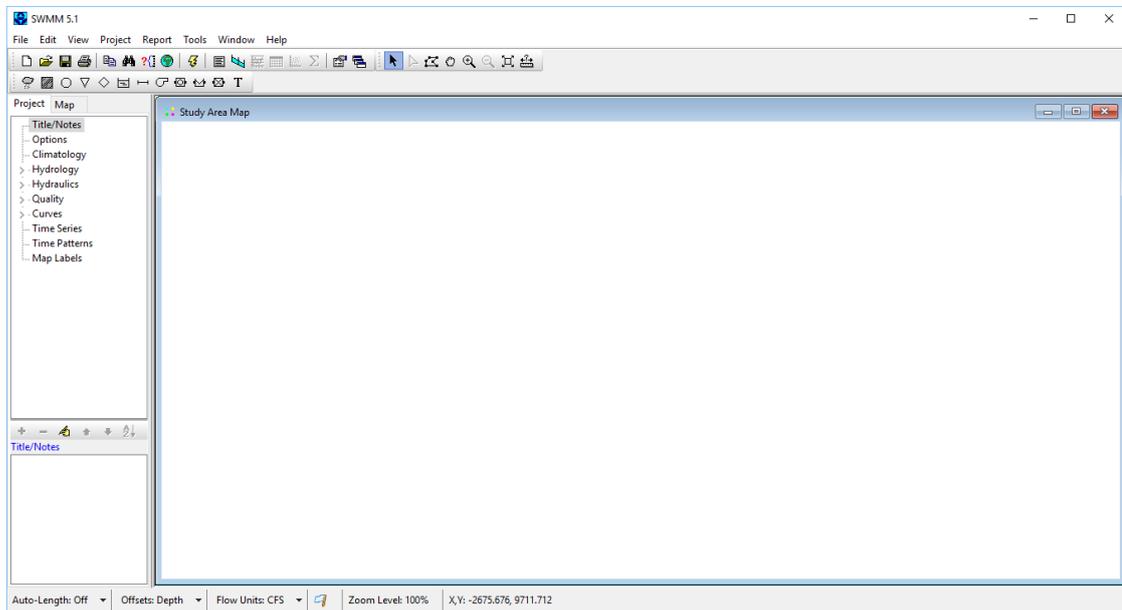
- Concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para controle de inundações.
- Dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas.

- Concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de sistemas unitários e mistos.
- Geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes (carga de contaminantes).
- Avaliação da eficácia das *BMP's* (Boas Práticas de Manejo) para reduzir o carreamento de poluentes durante a chuva.

Segundo Amorim (2007), os princípios utilizados pelo SWWM são:

- Propagação do escoamento superficial, avaliada pelo método do hidrograma unitário;
- Perdas hidrológicas, incluindo a retenção superficial e infiltração, modeladas pelas fórmulas de Horton e Green-Ampt e pelo “curva número (CN)” do Soil Conservative Service;
- Propagação do escoamento superficial, descrita pelo modelo cinemático;
- Propagação do escoamento na rede de coletores, descrita pelo modelo dinâmico completo (equações completas de Saint-Venant), ou modelo cinemático ou modelo difuso.

A Figura 13 ilustra a aparência primária do software SWWM 5.1.

Figura 13 - Tela inicial do SWWM 5.1

Fonte: Produção do autor.

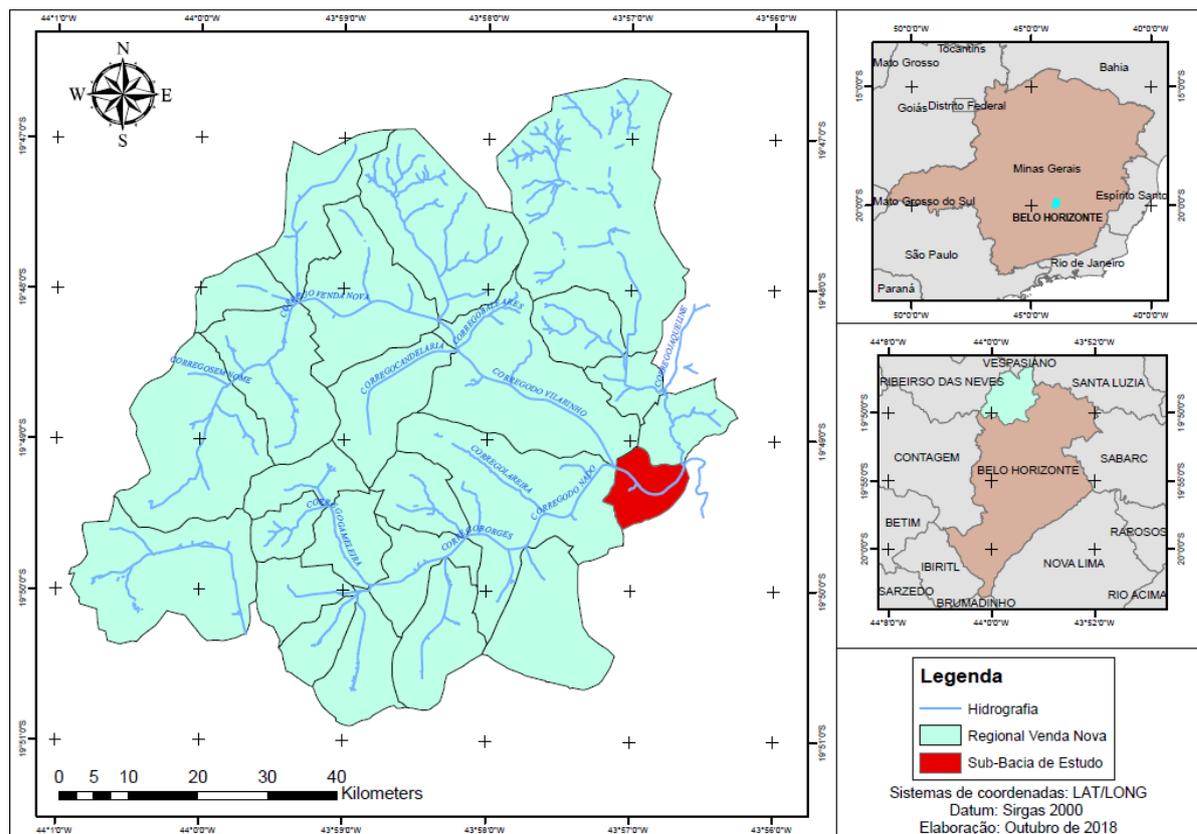
O SWMM é um software livre de distribuição gratuita, que vem sendo amplamente utilizado em estudos hidrológicos, com êxito nos resultados para bacias hidrográficas urbanas tanto em termos de quantidade quanto qualidade de águas precipitadas. Por estes motivos e por apresentar um módulo contendo as *BMP's*, o SWMM apresenta todas as características necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área escolhida para ser realizada a simulação hidrológica está localizada no bairro Vila Clóris, na Região Venda Nova de Belo Horizonte. A área determinada é uma sub-bacia do Córrego do Vilarinho, após a confluência deste com o Córrego do Nado. A área se caracteriza por ser completamente antropizada e em sua maioria, impermeabilizada. Nota-se a presença de um complexo comercial que engloba um shopping center e uma grande estação viária, bem como outros empreendimentos comerciais cercados por estacionamentos, como uma universidade, um hospital e uma grande obra da nova basílica de Belo Horizonte. A Figura 14 situa a sub-bacia a ser estudada dentro da cidade de Belo Horizonte.

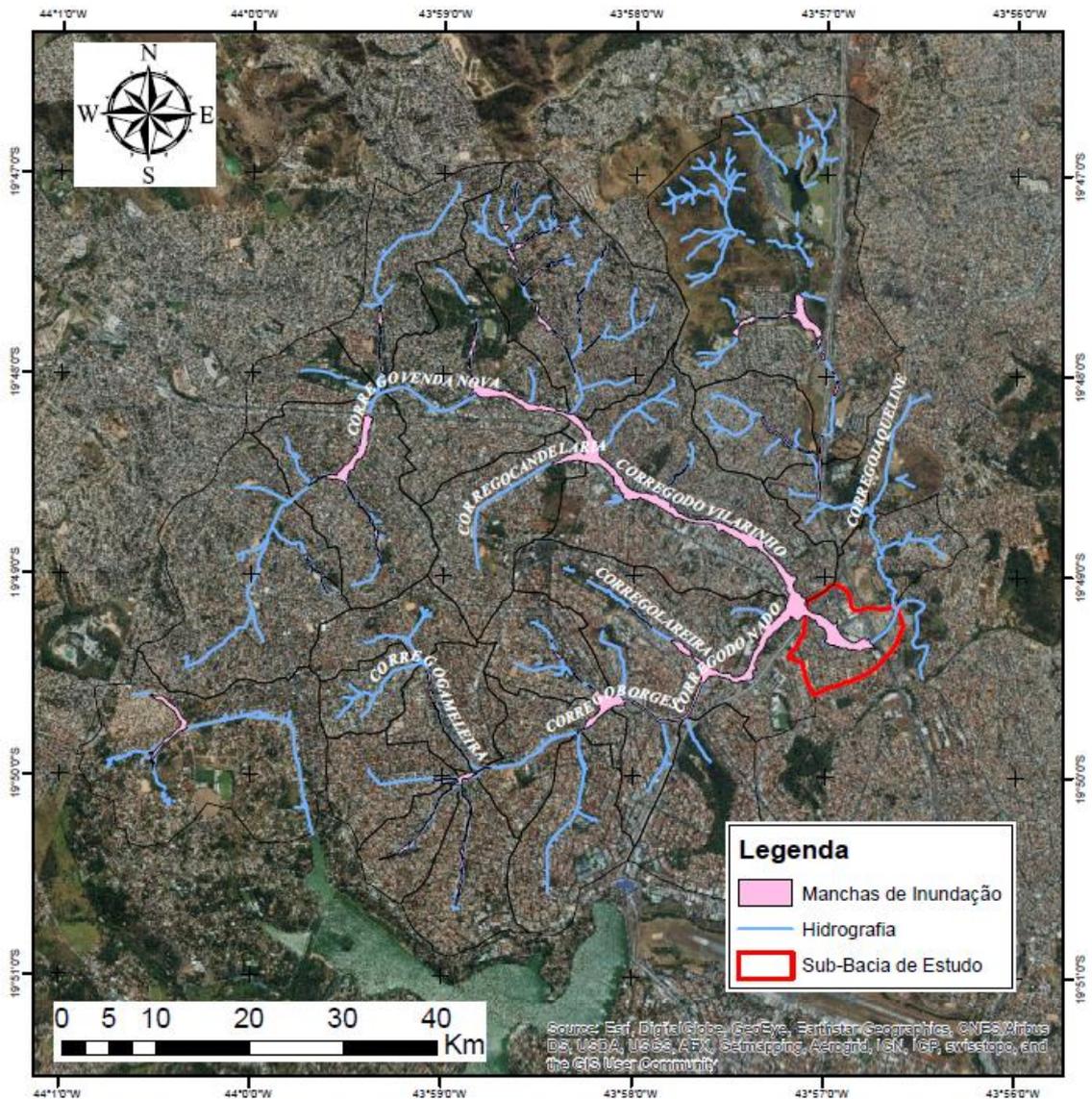
Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Produção do autor.

Em épocas de chuva forte, esta região sofre frequentemente com inundações, fato que motivou a escolha da área para este estudo. A Figura 15 demonstra a mancha de inundação da região.

Figura 15 - Mancha de inundação na regional Venda Nova



Fonte: Produção do autor.

A fim de se conhecer melhor a região de estudo e suas características, foram realizadas duas visitas de campo para registro fotográfico e realização do diagnóstico da área. Em seguida, foi realizada a digitalização da área de estudo por meio de ferramenta de Sistema de Informação Geográfica.

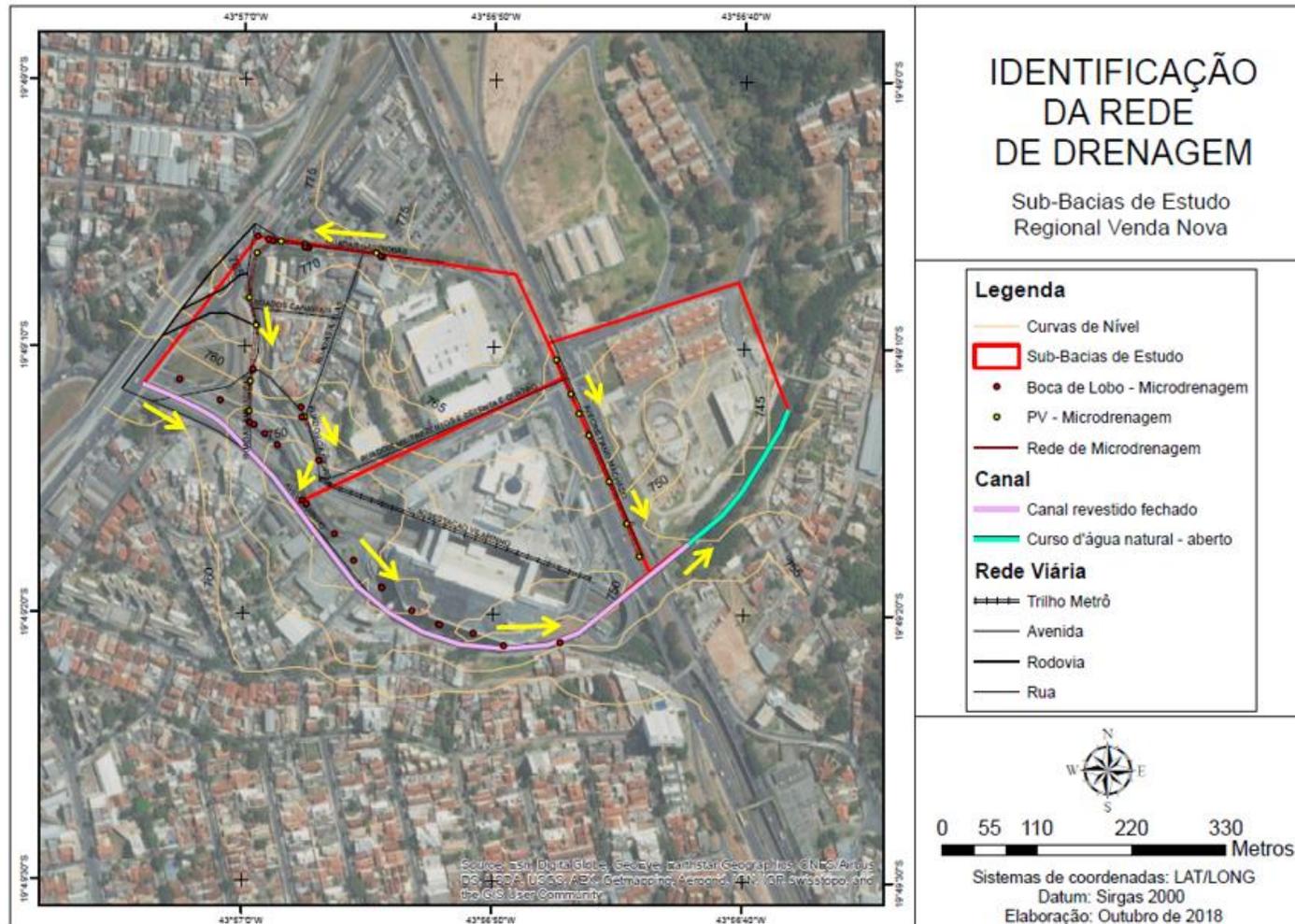
4.2 Digitalização da área de estudo

Para realizar a digitalização da área de estudo, foram solicitados, por meio de termo formal de compromisso, os arquivos geoespaciais em formato shapefile junto a Gerência de Sistema e Informações Ambientais (GESIA) da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA) e a Diretoria de Gestão de Águas Urbanas (DGAU) da Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura (SMOBI). Foram obtidos os dados referentes aos cursos hídricos, sub-bacias, mancha de inundação e dispositivos de micro e macrodrenagem da regional Venda Nova.

As curvas de nível da região foram obtidas através de um Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando uma imagem da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtida no site oficial do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Toda a manipulação de dados geográficos foi realizada em ferramenta de Sistema de Informação Geográfica, no software ArcGis versão 10.5.1, desenvolvido pela ESRI ® e no Google Earth Pro versão 7.3.1.4507, desenvolvido pela Google ®.

Através dos dados geográficos recebidos e da modelagem realizada com o MDE, foi possível constatar como se procede o escoamento pluvial na área. Após análises topográficas e geográficas e levando em consideração a rede de drenagem, a área de estudo foi dividida em 3 sub-bacias menores, de modo a se adequarem a forma de inserção de dados no modelo *Storm Water Management Model* – SWMM, a ser utilizado. A Figura 16 demonstra os dispositivos de drenagem pluvial existentes nas sub-bacias de estudo e o fluxo correspondente do escoamento indicado por meio das setas amarelas.

Figura 16 - Dispositivos de drenagem na área de estudo



Fonte: Produção do autor

4.3 Características físicas da área

De acordo com Venturim e Bahia (1998), na região de Belo Horizonte ocorrem Argissolos distróficos com coloração amarelada, originados de rochas graníticas e gnáissicas. Em trabalho realizado por Sartori *et al.* (2005), os solos brasileiros foram classificados pelo método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Foi constatado que o argissolo amarelo se enquadra dentro do Grupo Hidrológico C, que tem como características principais de serem solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm), com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão (SARTORI *et al.*, 2005).

Através do software ArcGis versão 10.5.1, desenvolvido pela ESRI®, foi possível calcular os seguintes parâmetros da bacia de estudo: área total de drenagem, perímetro das sub-bacias, extensão do curso d'água e diversas outras medidas necessárias na área. Na Tabela 2 são apresentadas as características físicas principais da área de estudo.

Tabela 2: Características físicas da área de estudo

Parâmetro	Valor
Área de drenagem (ha)	22,086
Perímetro (m)	1985,140
Extensão do curso d'água (m)	988,245
Declividade (m/m)	0,030
Coefficiente de compacidade Kc	1,191
Largura representativa (m)	651,139

Fonte: Produção do autor.

Através das curvas de nível foi possível identificar que a área de estudo possui altitude máxima de 775 metros e altitude mínima de aproximadamente 745 metros. Com isso, calculou-se a declividade média da área através da equação (1):

$$D = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L} \quad (1)$$

Em que:

D = Declividade média (m/m)

H_{max} = Altura máxima na bacia (m)

H_{min} = Altura mínima na bacia (m)

L = Extensão do curso d'água

A largura representativa do escoamento das sub-bacias foi determinada através da divisão da área de drenagem e o maior comprimento de fluxo, adotando este como o valor da largura do retângulo equivalente (GARCIA, 2005). Para o cálculo do comprimento, largura representativa e coeficiente de compacidade da bacia, foram utilizadas as equações (2), (3) e (4), respectivamente:

$$L = \frac{Kc * \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right] \quad (2)$$

$$W = \frac{A}{L} \quad (3)$$

$$Kc = 0,282 * \frac{Pm}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Em que:

W = largura representativa da bacia (m);

A = área da bacia (m²);

L = largura do retângulo equivalente (m);

Kc = coeficiente de compacidade;

Pm = perímetro da bacia (m).

O coeficiente de compacidade é um parâmetro que relaciona o perímetro da bacia e a área. Por definição, se $Kc = 1$, a forma da bacia é um círculo. Portanto, quanto maior o valor de Kc , mais irregular é a bacia e conseqüentemente, menor é a tendência de enchentes na mesma (VILLELA E MATTOS, 1975). O Kc da bacia em estudo tem o valor de 1,191, portanto se aproxima geometricamente de um círculo. Isso significa que o escoamento superficial de todos os afluentes converge ao mesmo tempo para um trecho relativamente pequeno do talvegue principal. Isso implica na potencialidade da produção de picos de vazão e na alta probabilidade de enchentes, que de fato ocorrem na região.

Após a definição das características físicas gerais da bacia de estudo como um todo, foi necessário determinar também estes e outros parâmetros para cada sub-bacia discretizada no ambiente do SWWM. Os passos para a realização da simulação hidrológica, bem como os parâmetros de entrada fornecidos são apresentados no tópico a seguir.

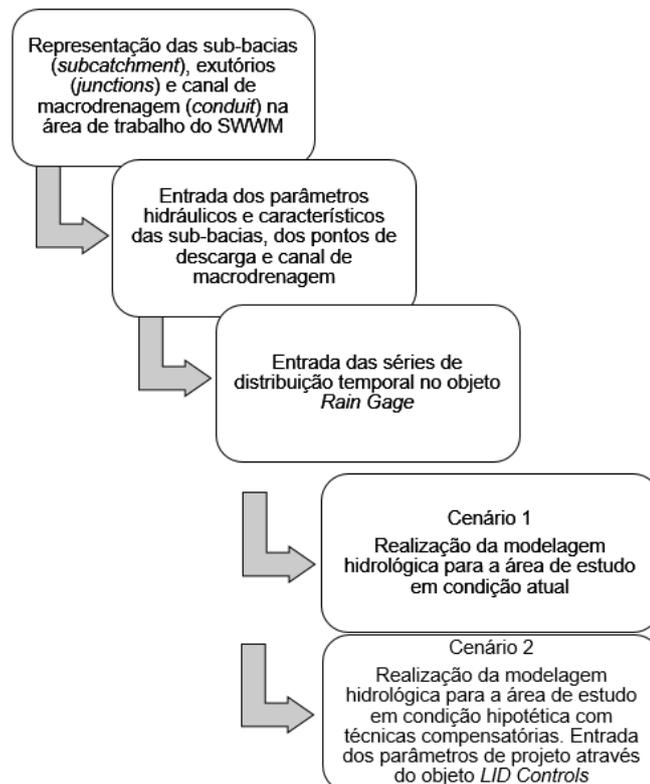
4.4 Modelagem Hidrológica no SWWM

A fim de se prever como as melhores práticas de gestão (*BMP's*) influenciam em parâmetros como infiltração, escoamento, tempo e vazão de pico na área de estudo, foi realizada uma modelagem hidrológica no software SWWM (*Storm Water Management Model*) versão 5.1, desenvolvido pela *U.S. EPA* (Agência de Proteção Ambiental dos EUA).

Para a realização da simulação hidrológica no referido modelo, dois diferentes cenários de gestão da água pluvial foram considerados para a realização deste trabalho. O cenário 1 representa a situação atual da área de estudo, enquanto o cenário 2 corresponde a uma situação hipotética, em que *BMP's* estruturais de retenção, infiltração e armazenamento fossem adotadas. Para este trabalho, foram escolhidos um jardim de chuva, uma trincheira de infiltração e barris de chuva residenciais, devido a disponibilidade de área nas sub-bacias.

A Figura 17 exibe o fluxograma das etapas básicas de execução da modelagem no software.

Figura 17 - Fluxograma das etapas de atividades no SWWM



Fonte: Produção do autor.

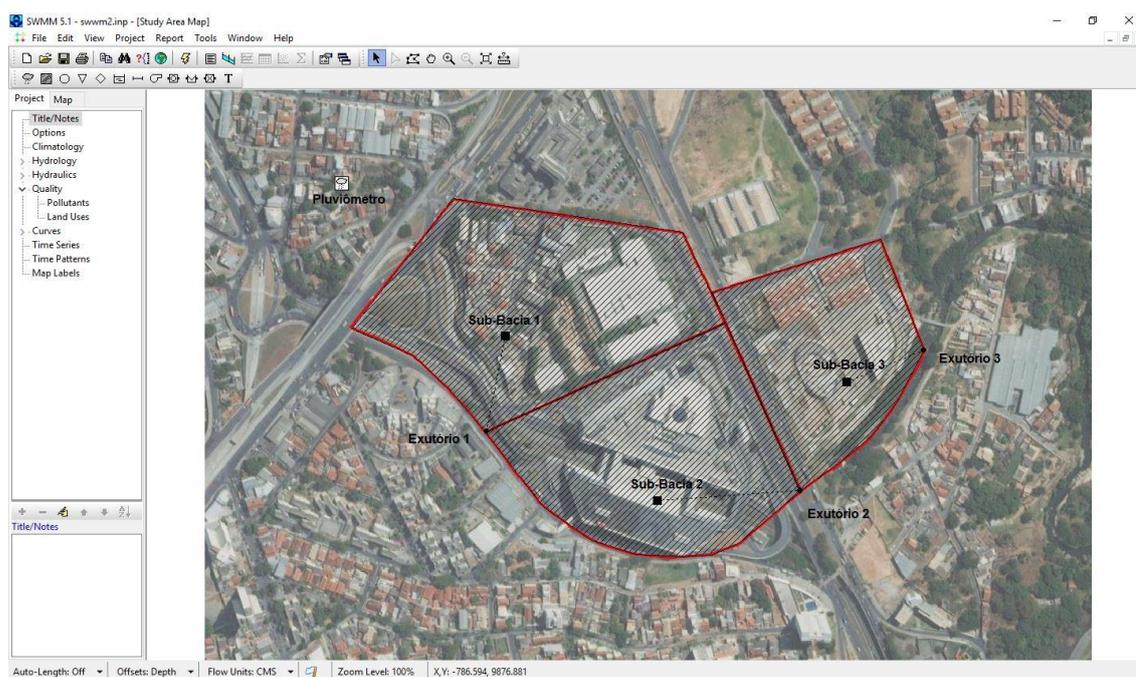
A modelagem hidrológica no SWMM requer a entrada de dados e parâmetros hidráulicos, hidrológicos. Para as estruturas compensatórias, ou *BMP's*, o software também requer dados de entrada. Todos os parâmetros necessários para a modelagem são apresentados nos subtópicos a seguir.

4.4.1 Entrada dos dados no modelo SWMM

Conforme o fluxograma da figura anterior, a representação da área de estudo no software envolve a adição dos objetos físicos *Subcatchment* (que representa a sub-bacia), *Rain Gage* (onde se adiciona a série temporal de chuva), *Junction* (representa os exutórios) e *Conduit* (que representa o córrego receptor do escoamento da sub-bacia).

A Figura 18 ilustra a tela do software após a adição da imagem de fundo e adição dos objetos físicos mencionados anteriormente. Os exutórios das sub-bacias foram considerados como a boca de lobo na cota mais baixa dentro da área da sub-bacia. Todos os elementos foram identificados e delimitados através dos mapas e análises realizadas com o auxílio das ferramentas de SIG. A conexão entre os exutórios caracterizou a formação do canal de macrodrenagem.

Figura 18 – Representação dos elementos adicionados no SWMM 5.1 e sub-bacias de estudo



Fonte: Produção do autor.

Após a criação dos elementos físicos dentro do software, é necessário fornecer os parâmetros específicos de cada elemento para a realização da simulação. A seguir, são apresentados todos os parâmetros considerados para este estudo, tendo como referência principal, o Manual do usuário do SWMM5.1 (ROSSMAN, 2015). Este manual apresenta diversas informações e tabelas de referência de diversos livros e artigos conceituados internacionalmente.

4.4.1.1 Dados de entrada das sub-bacias (subcatchments)

Após análises topográficas e geográficas e levando em consideração a rede de drenagem, a área de estudo foi dividida em 3 sub-bacias menores, de diferentes características. Para cada uma delas, são necessários dados específicos de entrada. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros (em inglês) requeridos no software SWMM 5.1, bem como suas descrições, unidades e valores determinados para cada sub-bacia em estudo.

Tabela 3: Parâmetros de entrada para as sub-bacias no SWMM

Parâmetro	Descrição	Sub-bacia		
		1	2	3
<i>Area</i>	Área da sub-bacia (ha)	8.948	7.755	5.383
<i>Width</i>	Largura representativa da sub-bacia (m)	369.522	276.498	253.288
<i>% Slope</i>	Declividade média da sub-bacia (%)	10.845	2.968	7.925
<i>% Imperv</i>	Porcentagem de área impermeável na sub-bacia (%)	65	85	75
<i>N-Imperv</i>	Coefficiente <i>n</i> de Manning para a área impermeável	0.011	0.013	0.011
<i>N-Perv</i>	Coefficiente <i>n</i> de Manning para a área permeável	0.40	0.15	0.15
<i>Dstore-Imperv</i>	Armazenamento em depressões para áreas impermeáveis (mm)	1.27	1.27	1.27
<i>Dstore-Perv</i>	Armazenamento em depressões para áreas permeáveis (mm)	5.08	5.08	5.08
<i>%Zero-Imperv</i>	Porcentagem de área impermeável sem armazenamento em depressões (%)	90	90	90
<i>Subarea Routing</i>	Forma de propagação do escoamento entre as áreas permeáveis e impermeáveis	Outlet	Outlet	Outlet
<i>Percent Routed</i>	Porcentagem do escoamento superficial propagado (%)	100	100	100
<i>Infiltration</i>	Modelo de infiltração considerado	Curve-Number	Curve-Number	Curve-Number

Fonte: ROSSMAN (2015) e LIMA (2011).

A porcentagem de área impermeável foi determinada através dos mapas e análises realizadas com o auxílio das ferramentas de SIG e das visitas de campo. Os coeficientes de Manning para áreas impermeáveis e o armazenamento em depressões para áreas impermeáveis foram determinados segundo o Manual do usuário do SWMM5.1. Dessa forma, para as sub-bacias 1 e 3, foi utilizado o valor de n de 0,011, correspondente a “asfalto liso” na tabela A.6 do manual, que simboliza a maior parte da área impermeável de ambas as sub-bacias. Para a sub-bacia 2, foi utilizado 0,013, que corresponde a “revestimento de concreto comum”, que simboliza o grande complexo comercial localizado nesta sub-bacia. O valor adotado para o armazenamento em depressões para áreas impermeáveis foi de 1,27 mm para todas as sub-bacias, que corresponde a variação indicada para “superfícies impermeáveis” na tabela A.5 do manual do usuário.

Já os valores para os coeficientes de Manning para áreas permeáveis, armazenamento em depressões para áreas permeáveis e a porcentagem de área impermeável sem armazenamento em depressões foram baseados nos estudos de Lima (2011) e dados presentes do Manual do usuário do SWMM5.1. Adotou-se, para a sub-bacia 1, uma ocupação do solo do tipo superfícies impermeáveis conjuntas com superfícies gramadas (número de Manning igual a 0,4 e armazenamento em depressão para superfícies gramadas igual a 5,08 mm), e para as sub-bacias 2 e 3 foi considerado o coeficiente de Manning igual a 0,15 para gramados baixos e armazenamento em depressões também de 5,08 mm, conforme variação indicada para gramados na tabela A.6 do Manual do usuário.

O modelo estabelece três modos de propagação de escoamento superficial gerado nas sub-bacias: “*Imperv*” – o escoamento corre das áreas permeáveis para as áreas impermeáveis; “*Perv*” – o escoamento corre das áreas impermeáveis para as áreas permeáveis; “*Outlet*” – o escoamento das áreas permeáveis e impermeáveis flui para a saída do elemento. Para todas as sub-bacias foi considerado o modo de propagação “*Outlet*”, uma vez que todo o escoamento superficial corre rapidamente para as ligações de microdrenagem e para as bocas de lobo.

Por fim, considerou-se que 100% do escoamento superficial é propagado dentro das sub-bacias, de modo a se analisar pontualmente a situação, sem a interferência de vazões afluentes.

4.4.1.2 Dados de infiltração

A simulação através do SWMM disponibiliza cinco possibilidades de modelagem de infiltração da água no solo: Equação de *Horton*, Equação de *Horton Modificado*, Método de *Green-Ampt*, Método de *Green-Ampt Modificado* e o Método *SCS Curva-Número*. Devido à preferência pelo Método *SCS Curva-Número* na maioria das bibliografias utilizando o modelo SWMM, este método foi escolhido para representar a infiltração de água no solo no presente estudo.

Conforme determinado anteriormente, o solo da área de estudo é caracterizado como argissolo amarelo distrófico e corresponde ao Grupo Hidrológico C. Os parâmetros de entrada necessários para a simulação da infiltração no SWMM são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de entrada para infiltração no SWMM

Parâmetros de entrada do método SCS	Valores correspondentes a sub-bacia		
	1	2	3
CN (Curva-Número)	90	94	91
"Drying Time" - Tempo de secagem (dias)	14	14	14

Fonte: ROSSMAN (2015)

Ambos os parâmetros foram definidos de acordo com as instruções do Manual do Usuário do SWMM5.1. Para a definição dos "CN" correspondentes, a tabela A.4 foi consultada. O tipo de uso do solo predominante considerado na sub-bacia 1 foi "Residencial", com área impermeável de aproximadamente 65%. Para a sub-bacia 2, o uso do solo determinado foi "Áreas comerciais e de negócios", com aproximadamente 85% de área impermeável. Por fim, para a sub-bacia 3, foi considerado o uso do solo como "área industrial" com áreas impermeáveis correspondentes a 72%. Apesar desta sub-bacia não apresentar uma área industrial, o número da curva adotado se refere a porcentagem de área impermeável que se assemelha com este dado determinado anteriormente.

Foi considerado um tempo de secagem (tempo em dias para um solo saturado secar por completo) de 14 dias, valor dentro da variação indicada no Manual do Usuário para solos argilosos.

4.4.1.3 Dados hidráulicos dos exutório e canal de macrodrenagem

O elemento “*Junction*”, dentro do campo “*Nodes*” representa os exutórios do escoamento de cada sub-bacia e requer como dado de entrada a cota em que se encontra. Foram consideradas as cotas mínimas de cada sub-bacia, ou seja, 750 metros para as sub-bacias 1 e 2; e 745 metros para a sub-bacia 3.

Para representar o Córrego do Vilarinho, foi utilizado o elemento “*Conduit*”, dentro do campo “*Links*”. Foram criados dois elementos dentro de “*conduits*”. O primeiro, ligando o exutório 1 ao exutório 2, onde foi adotada a forma canal fechado circular. A altura máxima do canal (diâmetro) e o comprimento do mesmo foram determinados através dos shapefiles recebidos e corresponderam a 1,2 e 505,366 metros, respectivamente. O coeficiente de rugosidade de Manning adotado foi de 0,015, conforme tabela A.4 do Manual do Usuário, para condutos fechados de concreto.

O segundo “*conduit*”, foi considerado ligando o exutório 2 ao exutório 3, com a forma canal aberto com seção transversal parabólica. A profundidade adotada foi de 2 metros e uma largura de topo do canal de aproximadamente 10 metros, aproximações essas obtidas por meio do software Google Earth e confirmadas *in loco*. O comprimento desta seção do córrego foi 252,369 m, e o coeficiente de rugosidade de Manning adotado foi de 0,05 correspondente ao valor médio para canais naturais de seção razoavelmente regular, de acordo com o Manual do Usuário do SWMM 5.1.

4.4.1.4 Dados pluviométricos

Para a realização da modelagem hidrológica, são necessários como dados pluviométricos de entrada, chuvas distribuídas temporalmente. O objeto físico de entrada de dados de chuva no modelo SWMM é o “*Rain Gage*”, onde se adicionou a série temporal para cada período de retorno considerado.

Para este estudo, foi adotado o Método de Blocos Alternados para apresentar a distribuição temporal. Para isso, utilizou-se a equação (5) de chuvas intensas para Belo Horizonte, obtida através do programa Plúvio 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa:

$$i = \frac{682,930 * (Tr)^{0,169}}{(tc + 3,3994)^{0,671}} \quad (5)$$

Em que:

i = intensidade da chuva (mm/h);

Tr = período de retorno (anos);

tc = tempo de concentração (minutos).

No presente estudo, foram realizadas simulações de chuvas com períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, valores razoáveis para uma análise pontual de controle na fonte. A duração de chuva adotada foi de 30 minutos, correspondente ao tempo de concentração da bacia, que é o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia escoe até o exutório (TUCCI, 2000). Seguindo a metodologia utilizada no trabalho, optou-se pelo cálculo do tempo de concentração através da metodologia SCS, pela equação (6):

$$tc = 3,42 * \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} * \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \quad (6)$$

Em que:

tc = tempo de concentração (min);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade do leito (m/m);

CN = parâmetro curva-número.

A distribuição temporal pelo método de blocos alternados, para determinado período de retorno, levou em consideração os seguintes passos:

- I. Criação de uma coluna com os intervalos de tempo começando do início da precipitação (1 minuto) até o final (30 minutos). O intervalo de tempo usado foi de 1 em 1 minuto;
- II. Utilização da equação (6), de chuvas intensas para Belo Horizonte, para cada intervalo de tempo, para determinar a intensidade no dado intervalo em mm/h;
- III. Cálculo de altura de precipitação acumulada em mm, para cada intervalo de tempo, sendo a precipitação acumulada a divisão entre a intensidade e o intervalo de tempo correspondente;

- IV. Cálculo de altura de precipitação incrementada em mm, a cada intervalo de tempo, sendo esta a diferença entre a precipitação acumulada a um certo tempo e a precipitação acumulada no tempo imediatamente anterior;
- V. Reordenação das alturas de precipitações incrementadas seguindo o arranjo 4-2-1-3-5, assim como recomendado pelo *Soil Conservation Service (SCS)*.

O **Apêndice A** apresenta as tabelas de distribuição temporal para os períodos de retorno escolhidos.

4.4.1.5 Dados de entrada das BMP's

Para representar as técnicas compensatórias, ou *BMP's*, adotadas no cenário 2 de modelagem no SWWM, foi utilizado o elemento "*LID Control*" dentro do campo "*Hydrology*". O SWWM 5.1 oferece oito tipos diferentes de técnicas, sendo elas: célula de biorretenção, jardim de chuva, telhado verde, trincheira de infiltração, pavimento permeável, barril de chuva, desconexão de telhados e vala vegetada. Na Tabela 5 são apresentadas as *BMP's* escolhidas neste estudo e seus efeitos hidrológicos esperados.

Tabela 5: *BMP's* adotadas no Cenário 2 de modelagem

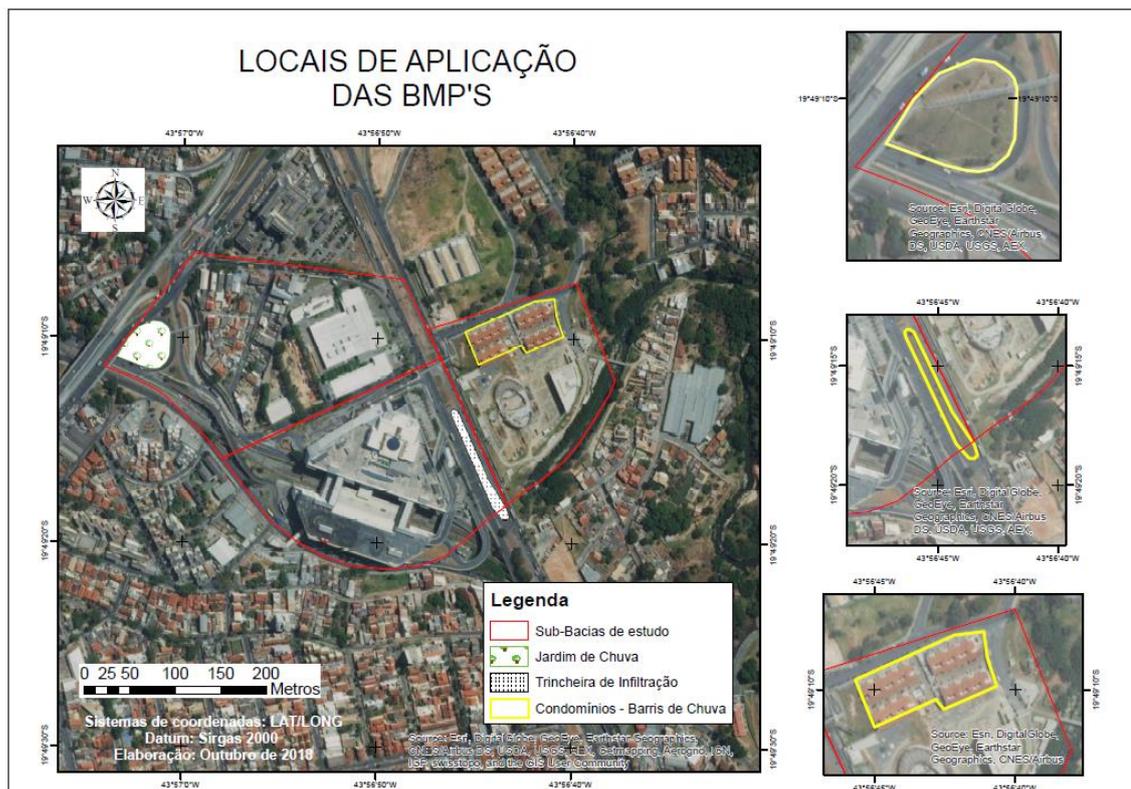
BMP	Sub-bacia aplicada	Efeito esperado
<i>Jardim de chuva</i>	1	Retenção e diminuição de escoamento, redução de pico de vazão
<i>Trincheira de infiltração</i>	2	Aumento de infiltração, redução de escoamento e redução de pico de vazão
<i>Barril de chuva</i>	3	Retenção de escoamento, armazenamento e redução de pico de vazão

Fonte: Produção do autor.

Os locais de aplicação das *BMP's* foram escolhidos com base nas análises geográficas de imagem de satélite e durante a visita de campo. O jardim de chuva foi proposto na Praça dos Abacateiros, local adjacente à Av. Dom Pedro I e Av. Vilarinho, que possui apenas um gramado e árvores isoladas esparsas. A trincheira de infiltração foi proposta em uma parte do canteiro central da Av. Cristiano Machado, de modo a recolher parte do escoamento proveniente da via. Já os barris de chuva foram propostos para todas as residências dos Condomínios Residenciais Ilha Bela e Parati,

contíguos à obra da nova Basílica de Belo Horizonte. A Figura 19 mostra os três locais de aplicação das técnicas propostas.

Figura 19 - Locais de aplicação das BMP's



Fonte: Produção do autor.

Da mesma forma que os outros elementos adicionados ao SWWM, os objetos do *LID Control* exigem dados de entrada específicos de cada estrutura, tais como tipos de solo, dimensionamento, armazenamento e superfície. Neste momento, foram consideradas as diretrizes construtivas apresentadas no Manual de práticas de gestão de água de chuva da Pensilvânia, no Manual técnico de projeto de jardins de chuva do Condado de Montgomery - Maryland e no Manual do usuário do SWWM 5.1.

Ao criar a estrutura do jardim de chuva, são necessários parâmetros de superfície e solo. Os parâmetros exigidos, suas descrições e os valores adotados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros de entrada para jardim de chuva

Parâmetro	Descrição	Valor
Parâmetros de Superfície		
<i>Berm height (mm)</i>	Altura da berma adjacente ao jardim de chuva	152,4
<i>Vegetation volume fraction</i>	Fração de vegetação plantada no jardim de chuva	0,1
<i>Surface roughness</i>	Coefficiente <i>n</i> de Manning para a superfície	0,4
<i>Surface slope (%)</i>	Declividade da superfície	0
Parâmetros de Solo		
<i>Thickness (mm)</i>	Espessura	450
<i>Porosity (volume fraction)</i>	Porosidade	0,437
<i>Field capacity (volume fraction)</i>	Capacidade de campo	0,105
<i>Wilting point (volume fraction)</i>	Ponto de murcha	0,047
<i>Conductivity (mm/hr)</i>	Condutividade hidráulica	29,972
<i>Conductivity slope</i>	Taxa de condutividade	45
<i>Suction head (mm)</i>	Pressão de sucção	60,96

Fonte: ROSSMAN (2015) e DEP (2006).

Primeiramente, os parâmetros de superfície foram definidos. A altura máxima da berma adjacente ao jardim, que segura a água no jardim, foi adotada de acordo com o Manual de práticas de gestão de água de chuva da Pensilvânia, no qual define a altura máxima de 6 polegadas, ou 152,4 mm. A fração de volume de vegetação no jardim foi considerada como 10%, que segundo o Manual do usuário do SWWM 5.1, corresponde a um crescimento vegetativo denso, uma vez que é recomendado o uso de plantas com grande resistência às intempéries, principalmente calor e umidade. O coeficiente de Manning adotado corresponde a uma área de vegetação rasteira leve, de acordo com a tabela A.5 do manual do usuário. Este mesmo manual define que a declividade da superfície é um parâmetro aplicado somente para superfície de telhados, pavimentos ou valas vegetadas. Por este motivo, o valor considerado foi 0.

Em sequência, os parâmetros do solo foram definidos. A espessura do solo considerada foi 450 mm, dentro do intervalo apresentado para jardins de chuva (450 a 900 mm) no manual do usuário do SWWM. Para se definir o restante dos parâmetros, foi considerado que o solo ideal para um jardim de chuva deve ser composto de 50% de areia, 25% de composto orgânico e 25% de solo de cobertura, seguindo as diretrizes do Manual técnico de projeto de jardins de chuva do Condado de Montgomery. Com isso, escolheu-se o tipo de solo “*loamy sand*”, que predomina a

fração arenosa, com menor fração argilosa e adotou-se seus parâmetros de acordo com a tabela A.2 do manual do usuário.

Após criar o objeto correspondente ao jardim de chuva no SWWM, o mesmo foi adicionado à sub-bacia correspondente. Com isso, são necessários dados de dimensionamento da estrutura. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros necessários, suas descrições e os valores adotados.

Tabela 7: Parâmetros de dimensionamento do jardim de chuva

Parâmetro	Descrição	Valor
Parâmetros de Dimensionamento		
<i>Area of each unit (m²)</i>	Área do jardim de chuva	4000
<i>Number of units</i>	Número de unidades	1
<i>Surface width per unit (m)</i>	Largura superficial do jardim de chuva	0
<i>% Initially saturated</i>	% de saturação inicial do solo	0
<i>% of impervious area treated</i>	% de área impermeável tratada	10

Fonte: ROSSMAN (2015).

A área a ser considerada foi obtida através do software Google Earth Pro versão 7.3. Foi considerado somente um grande jardim de chuva que irá ocupar todo o terreno considerado. Conforme o Manual do Usuário do SWWM, a largura superficial é aplicável somente para telhados, pavimentos, trincheiras e valas. Por este motivo, o parâmetro foi desconsiderado. A porcentagem de saturação do solo do jardim de chuva foi considerada como 0%, simulando assim um solo inicialmente seco que irá receber o escoamento superficial adjacente. Foi calculado através do Google Earth Pro versão 7.3 que 10% de toda a área impermeável da sub-bacia 1 irá ser direcionada ao jardim de chuva, área essa que corresponde às grandes vias asfaltadas próximas ao local de implantação do mesmo.

Para a estrutura de trincheira de infiltração, é necessária a entrada de parâmetros de superfície e armazenamento. A Tabela 8 resume os parâmetros necessários, descrições e os valores adotados.

Tabela 8: Parâmetros de entrada para a trincheira de infiltração

Parâmetro	Descrição	Valor
Parâmetros de Superfície		
<i>Berm height (mm)</i>	Altura da berm adjacente a trincheira	152,4
<i>Vegetation volume fraction</i>	Fração de vegetação	0

<i>Surface roughness</i>	Coeficiente <i>n</i> de Manning para a superfície	0,15
<i>Surface slope (%)</i>	Declividade da superfície	0
Parâmetros de Armazenamento		
<i>Thickness (mm)</i>	Espessura	182,88
<i>Void Ratio (Voids/Solids)</i>	Índice de vazios	0,75
<i>Seepage Rate (mm/hr)</i>	Taxa de infiltração	14,478
<i>Clogging Factor</i>	Fator de entupimento	0

Fonte: ROSSMAN (2015) e DEP (2006)

Novamente, os parâmetros de superfície foram os primeiros a serem definidos. A altura da berma adjacente à trincheira foi a mesma adotada para o jardim de chuva, valor também definido no Manual de práticas de gestão de água de chuva da Pensilvânia. A fração de vegetação da trincheira foi zero, pois não haverá plantio de espécies acima do material poroso, somente gramíneas baixas. O coeficiente de Manning adotado corresponde a uma área de gramíneas baixas, de acordo com a tabela A.5 do manual do usuário do SWWM 5.1. O parâmetro declividade da superfície foi novamente anulado.

Em sequência, os parâmetros de armazenamento foram definidos. A espessura adotada foi de 182,88 mm (ou 6 pés), conforme o máximo sugerido pelo Manual de práticas de gestão de água de chuva da Pensilvânia. O índice de vazios adotado foi o máximo sugerido pelo Manual do usuário do SWWM, uma vez que quanto mais vazios, melhor é a infiltração da água na estrutura. A taxa de infiltração no solo considerada foi referente a condutividade hidráulica para solos do grupo C, conforme tabela A.3 do Manual do usuário. Para simplificação do modelo, não foi considerado fator de entupimento. Por este mesmo motivo, a aba de parâmetros de Dreno foi desconsiderada, uma vez que a estrutura não terá drenos de fundo.

Após criar o objeto correspondente a trincheira de infiltração no SWWM, o mesmo foi adicionado à sub-bacia 2. Com isso, foi necessária a entrada de dados de dimensionamento da estrutura. Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros necessários, bem como suas descrições e os valores adotados.

Tabela 9: Parâmetros de dimensionamento da trincheira de infiltração

Parâmetro	Descrição	Valor
Parâmetros de Dimensionamento		
<i>Area of each unit (m²)</i>	Área da trincheira de infiltração	2400
<i>Number of units</i>	Número de unidades	1
<i>Surface width per unit (m)</i>	Largura superficial da trincheira	10

<i>% Initially saturated</i>	% de saturação inicial da estrutura de armazenamento	0
<i>% of impervious area treated</i>	% de área impermeável tratada	5

Fonte: ROSSMAN (2015)

A área a ser considerada e a largura superficial da trincheira foram obtidas através do software Google Earth Pro versão 7.3. A estrutura foi considerada sem presença de água ao iniciar a infiltração. A porcentagem de área impermeável tratada considerada foi referente à metade das duas mãos da Av. Cristiano Machado, ao longo de toda a trincheira, o que resultou em 5% de toda a área impermeável da sub-bacia 2.

Por fim, foi necessário também entrar com dados de armazenamento e dreno para os barris de chuva. O único parâmetro de armazenamento é a altura útil do barril, considerada como 900 mm, conforme o Manual do Usuário do SWWM para um barril de chuva de uma casa unifamiliar. A aba de parâmetros de Dreno, que é opcional, foi desconsiderada. Definiu-se que a água excedente do sistema de barris de chuva será simplesmente lançada nas áreas livre das residências através de um extravasor. Após criar o objeto de barril de chuva e adicioná-lo à sub-bacia 3, foi necessária a entrada dos dados de dimensionamento da estrutura. Os parâmetros necessários, suas descrições e os valores adotados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de dimensionamento do barril de chuva.

Parâmetro	Descrição	Valor
<i>Parâmetros de Dimensionamento</i>		
<i>Area of each unit (m²)</i>	Área do barril de chuva	0,554
<i>Number of units</i>	Número de unidades	15
<i>Surface width per unit (m)</i>	Largura superficial da unidade	0
<i>% Initially saturated</i>	% de saturação inicial da estrutura	0
<i>% of impervious area treated</i>	% de área impermeável tratada	5

Fonte: ROSSMAN (2015).

A área definida para o barril foi calculada tomando como base um barril de 500 litros, padrão para o reaproveitamento de chuva residencial. O número de 15 unidades correspondeu ao número de residências dos dois Condomínios contíguos no local: Condomínios Residenciais Ilha Bela e Parati. A largura superficial não se aplica para esta estrutura. Foi considerado que todos os barris estejam vazios ao iniciar a

precipitação. A área impermeável tratada de 5% foi calculada através da área útil de metade dos telhados das residências, uma vez que a disposição das calhas impede que todo o escoamento seja direcionado para um único barril.

Após a criação de todas as estruturas no SWWM e realização de todas as ligações e relações, as simulações foram realizadas para os dois cenários e para os três tempos de retorno definidos. Os resultados da modelagem estão apresentados a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cenário 1

A primeira simulação realizada no SWWM foi referente ao cenário 1, em que foi representada a situação atual da área de estudo, sem a presença de *BMP's*. As Tabelas 11, 12 e 13 exibem o relatório simplificado gerado pelo software, adaptado para os parâmetros de interesse deste estudo, variando o período de retorno da distribuição temporal.

Tabela 11: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 2 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	36.03	7.58	26.44	3.35	0.734
Sub-bacia 2	36.03	2.12	32.67	2.79	0.907
Sub-bacia 3	36.03	4.98	30.17	2.28	0.837

Fonte: Produção do autor.

Tabela 12: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 5 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	42.06	7.91	31.94	4.02	0.759
Sub-bacia 2	42.06	2.17	38.63	3.41	0.918
Sub-bacia 3	42.06	5.17	35.96	2.77	0.855

Fonte: Produção do autor.

Tabela 13: Resultados da simulação para o cenário 1 - Período de retorno: 10 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	47.29	8.13	36.79	4.63	0.778
Sub-bacia 2	47.29	2.2	43.81	3.96	0.926
Sub-bacia 3	47.29	5.3	41.02	3.21	0.867

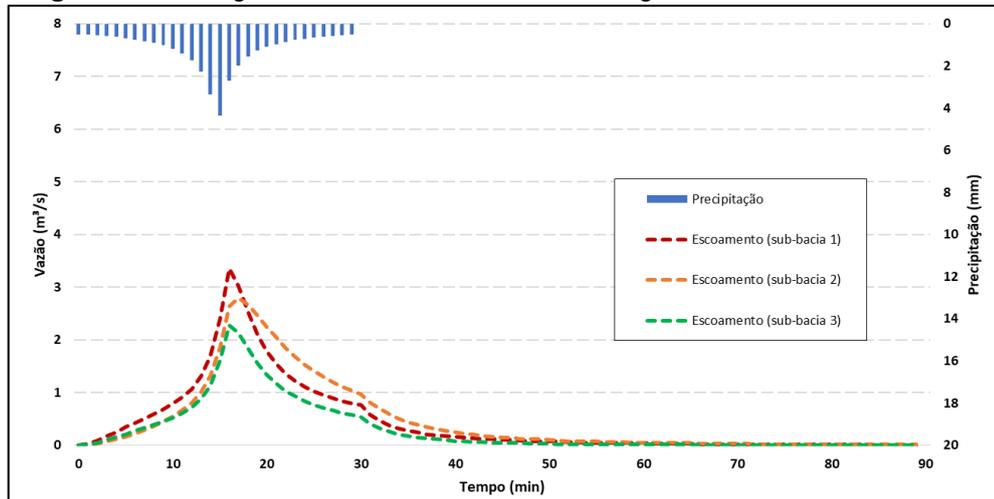
Fonte: Produção do autor.

É possível confirmar através dos resultados que os efeitos da urbanização e impermeabilização do solo causam um maior volume total escoado em comparação com o infiltrado. A sub-bacia 1, por ter a menor porcentagem de área impermeável, apresentou um maior volume de água infiltrado e um menor volume de escoamento,

em comparação com as outras duas sub-bacias. Já a sub-bacia 2, com maior porcentagem de área impermeável, apresentou um valor mais baixo de infiltração e mais alto de escoamento, se comparada com as outras duas sub-bacias. Fato este que ocasionou num maior coeficiente de escoamento para esta bacia, uma vez que o coeficiente de escoamento é calculado através da divisão do volume escoado pelo volume total precipitado. A maior vazão de pico ocorre na sub-bacia 1, devido a sua maior declividade e conseqüente maior velocidade de escoamento.

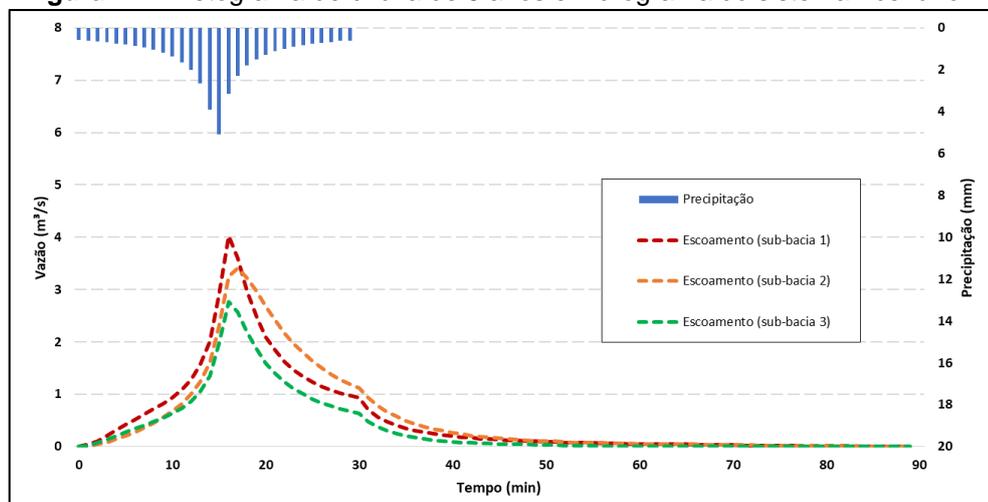
As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os hidrogramas correspondentes ao escoamento das três sub-bacias discretizadas neste estudo, juntamente com o hietograma de precipitações com períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos.

Figura 20 - Hietograma de chuva de 2 anos e hidrograma do sistema - cenário 1



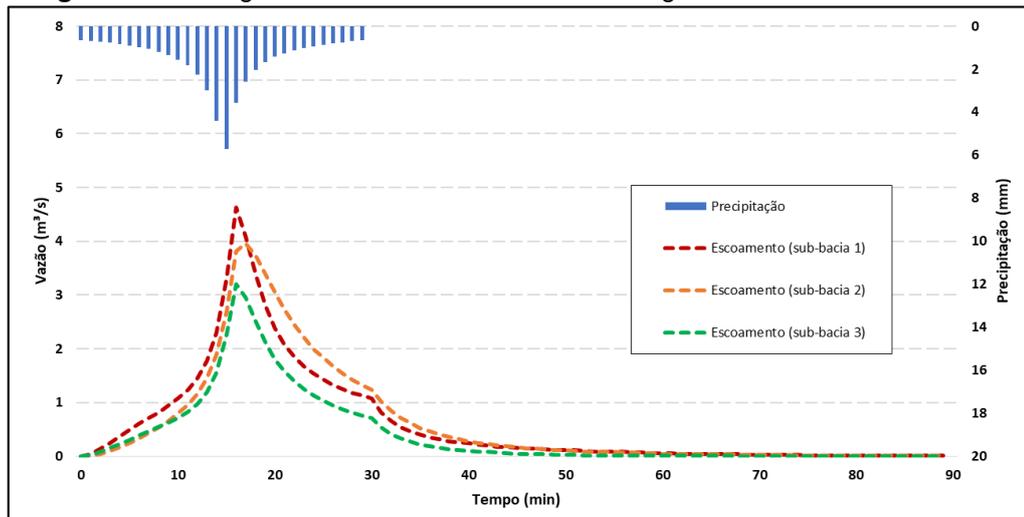
Fonte: Produção do autor.

Figura 21 - Hietograma de chuva de 5 anos e hidrograma do sistema - cenário 1



Fonte: Produção do autor.

Figura 22 - Hietograma de chuva de 10 anos e hidrograma do sistema - cenário 1



Fonte: Produção do autor.

Por meio dos gráficos apresentados, é possível perceber que, como esperado, ao aumentar o período de retorno das precipitações, as mesmas possuem maior intensidade e, dessa forma, causam uma maior vazão de escoamento, bem como um maior pico de vazão. Ainda, para todos os períodos de retorno, o pico de vazão ocorre entre os minutos 16 e 17. A contribuição de toda a bacia ocorre após o tempo de concentração (30 minutos), quando pode-se observar uma inflexão nos hidrogramas. O escoamento após este tempo se justifica devido ao volume restante das áreas permeáveis retardados pela infiltração e armazenamento em depressões.

5.2 Cenário 2

Em um segundo momento, com o objetivo de reduzir o volume total escoado e amortecer as vazões de pico das sub-bacias, foi realizada a modelagem referente ao cenário 2, após a adição de três técnicas compensatórias de retenção, infiltração e armazenamento. Um jardim de chuva foi aplicado na sub-bacia 1, uma trincheira de infiltração na sub-bacia 2 e 15 barris de chuva residenciais na sub-bacia 3. Nas Tabelas 14, 15 e 16 são apresentados novamente os valores dos parâmetros de interesse deste estudo, porém com adição das *BMP's*, variando o período de retorno da distribuição temporal.

Tabela 14: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 2 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	36.03	7.25	23.08	2.91	0.641
Sub-bacia 2	36.03	2.71	30.23	2.6	0.839
Sub-bacia 3	36.03	4.98	30.03	2.28	0.833

Fonte: Produção do autor.

Tabela 15: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 5 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	42.06	7.60	28.11	3.52	0.668
Sub-bacia 2	42.06	2.76	35.75	3.18	0.850
Sub-bacia 3	42.06	5.17	35.82	2.77	0.852

Fonte: Produção do autor.

Tabela 16: Resultados da simulação para o cenário 2 - Período de retorno: 10 anos

Sub-bacia	Precipitação total (mm)	Infiltração total (mm)	Escoamento total (mm)	Vazão de pico (m ³ /s)	Coefficiente de escoamento
Sub-bacia 1	47.29	7.81	32.45	4.04	0.686
Sub-bacia 2	47.29	2.79	40.56	3.69	0.858
Sub-bacia 3	47.29	5.3	40.88	3.21	0.864

Fonte: Produção do autor.

É possível perceber após a análise dos resultados que para a sub-bacia 1 o volume de infiltração diminuiu após a aplicação do jardim de chuva. Este fato pode ser explicado devido ao fato desta estrutura ser responsável por uma grande retenção de água nas folhas e caules da vegetação, bem como no solo para nutrição das plantas. Outro fator responsável por esta diminuição é o aumento da evapotranspiração após a instalação da estrutura. Quanto a sub-bacia 2, devido às características da BMP escolhida, houve um aumento de aproximadamente 27% no volume infiltrado, para os três tempos de retorno. Não houve alteração no volume infiltrado para a sub-bacia 3, o que era esperado, uma vez que os barris de chuva não são estruturas que promovem infiltração no solo.

Em relação ao volume total escoado, houve uma diminuição deste valor para as 3 sub-bacias em todos os períodos de retorno. A estrutura que apresentou melhor eficiência de redução (cerca de 12%), foi o jardim de chuva. A trincheira de infiltração provocou uma diminuição de cerca de 7% do total escoado. Os barris de chuva apresentaram apenas cerca de 0,5% de redução de escoamento.

A vazão de pico também apresentou diminuição para as sub-bacias 1 e 2. Para a primeira, a redução foi de cerca de 12 a 13% para os três tempos de retorno. Para a segunda sub-bacia, a redução foi de aproximadamente 6,8%. Não houve diminuição da vazão de pico após a adoção dos barris de chuva residenciais. Este resultado não era esperado, uma vez que esta estrutura promove um armazenamento de parte do volume precipitado e uma diminuição na velocidade de escoamento. A variação nula de vazão de pico após a adoção desta BMP pode ser justificada pelo volume do barril proposto. Os barris de 500 L em cada residência não foram capazes de amortecer a vazão de pico pois são ínfimos em comparação com o volume de precipitação.

Após a introdução das 3 *BMP's* no sistema, foi possível perceber uma diminuição do escoamento e um amortecimento da vazão de pico, conforme planejado. Os coeficientes de escoamento também sofreram um decréscimo, uma vez que o volume escoado diminuiu e a precipitação se manteve constante.

As Tabelas 17 18 e 19 resumem as porcentagens de variação dos valores de infiltração, escoamento, vazão de pico e coeficiente de escoamento após a introdução das *BMP's*.

Tabela 17: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 2 anos

Sub-bacia	Variação Infiltração total (%)	Variação Escoamento total (%)	Variação Vazão de pico (%)	Variação Coef. de escoamento (%)
Sub-bacia 1	-4.35	-12.71	-13.13	-12.67
Sub-bacia 2	+27.83	-7.47	-6.81	-7.50
Sub-bacia 3	0	-0.46	0	-0.48

Fonte: Produção do autor.

Tabela 18: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 5 anos

Sub-bacia	Variação Infiltração total (%)	Variação Escoamento total (%)	Variação Vazão de pico (%)	Variação Coef. de escoamento (%)
Sub-bacia 1	-3.92	-11.99	-12.44	-11.99
Sub-bacia 2	+27.19	-7.45	-6.74	-7.41
Sub-bacia 3	0	-0.39	0	-0.35

Fonte: Produção do autor.

Tabela 19: Variação dos resultados para o cenário 2 - Período de retorno: 10 anos

Sub-bacia	Variação Infiltração total (%)	Variação Escoamento total (%)	Variação Vazão de pico (%)	Variação Coef. de escoamento (%)
Sub-bacia 1	-3.94	-11.80	-12.74	-11.83
Sub-bacia 2	+26.82	-7.42	-6.82	-7.34
Sub-bacia 3	0	-0.34	0	-0.35

Fonte: Produção do autor.

O gradual declínio da eficiência de redução das *BMP's* à medida que a intensidade das chuvas aumenta para os diferentes períodos de retorno é justificado pelo fato de ocorrer uma sobrecarga das *BMP's* para maiores volumes de precipitação. Entretanto, esta diferença pode ser considerada pequena, indicando que as estruturas de jardim de chuva e trincheira de infiltração estão bem dimensionadas para chuvas de até 10 anos de retorno. Os barris de chuva, uma vez que seus resultados não foram satisfatórios, necessitam de melhor dimensionamento, bem como a proposição de outras alternativas para a sub-bacia 3.

Todos os gráficos referentes a comparação das vazões de escoamento das três sub-bacias discretizadas, para os dois cenários de simulação estão apresentados no **Apêndice B**.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo comparar dois diferentes cenários de gestão da água pluvial em uma sub-bacia do Córrego do Vilarinho, localizado na Região Venda Nova de Belo Horizonte. Para tal, foi realizada uma modelagem hidrológica no software *Storm Water Management Model* (SWMM) com a proposição de técnicas compensatórias de melhores práticas de gestão, ou *BMP's – Best Management Practices*. Os resultados da simulação no SWMM indicam que o software se mostrou adequado para este tipo de simulação em sub-bacias urbanas. Após a realização da simulação o erro obtido foi de 0,12%, considerando os resultados confiáveis. É importante destacar que o software apresenta uma gama de parâmetros e variáveis que não foram utilizados neste trabalho e que podem gerar modelagens mais complexas e confiáveis. A simulação aqui realizada foi simplificada para analisar apenas os parâmetros quantitativos de gestão pluvial da bacia em estudo. Além disso, softwares são importantes e convenientes ferramentas, mas é necessário conhecimento ou ainda a utilização de ferramentas e cálculos adicionais para tomada de decisões adequadas.

Os resultados do primeiro cenário, em que foi simulada a situação hidrológica atual da área, corroboram a tese de que a urbanização e a impermeabilização do solo alteram a dinâmica hidrológica da bacia em estudo. Foi constatado um baixo volume de água infiltrado em relação ao volume de escoamento superficial em todas as três sub-bacias discretizadas no modelo. A vazão de pico apresentou valores significativamente altos, chegando no valor de 4.63 m³/s em uma das três sub-bacias para uma chuva intensa com período de retorno de 10 anos.

Como tentativa de encontrar uma solução conjunta este atual problema e seguindo a tendência mundial da Drenagem Urbana Sustentável, foi proposto um hipotético segundo cenário, em que foi adicionado um jardim de chuva, uma trincheira de infiltração e barris de chuva residenciais em cada uma das três sub-bacias. Neste cenário, resultados promissores foram obtidos. O jardim de chuva foi capaz de reduzir em média 12%, tanto o volume escoado quanto a vazão de pico da sub-bacia em que o mesmo foi alocado, para todas as chuvas de 2, 5 e 10 anos. Já a trincheira de infiltração foi capaz de aumentar em aproximadamente 27% o volume infiltrado na sub-bacia 2, além de reduzir o escoamento e a vazão de pico em cerca de 7%, para

todos os tempos de retorno da precipitação. Em contrapartida, não foram obtidos resultados satisfatórios para os barris de chuva propostos, uma vez que a redução no volume de escoamento não alcançou 0,5% na sub-bacia 3.

É importante ressaltar que não foram levadas em consideração certas limitações para a implantação das técnicas compensatórias, tais como parâmetros estruturais, tipos específicos de solo, estruturas subterrâneas, entre outros. Antes da decisão da implantação de tais técnicas, são necessários inúmeros estudos adicionais de viabilidade econômica, construtiva e ambiental. Além disso, a maioria das técnicas compensatórias foram desenvolvidas para realidades diferentes da que vivemos no Brasil, tanto financeira, quanto de clima e vegetação. Entretanto, não se desclassifica a tecnologia apenas por ela ter sido desenvolvida em outro país. Recomenda-se sempre buscar adaptações e transformações com base em estudos aprofundados, para que as mesmas sejam efetivas em outros locais.

Acrescenta-se que a simulação realizada neste estudo foi focada apenas em resultados de dados quantitativos de escoamento, infiltração e vazões de pico. Contudo, as *BMP's* são largamente utilizadas para o controle de qualidade do escoamento, podendo reter os poluentes carregados de telhados e vias pavimentadas, principalmente nas estruturas de biorretenção, como os jardins de chuva. Por este motivo, recomenda-se a realização de novas modelagens incluindo parâmetros qualitativos na análise.

Por fim, conclui-se que as *BMP's* são importantes técnicas de controle na fonte e que geram resultados satisfatórios na busca da solução conjunta para os problemas das enchentes e inundações em centros urbanos. Espera-se que estudos como este induzam a popularização destas técnicas no âmbito político, em associação com outras técnicas estruturais e não-estruturais de drenagem, buscando sempre um ambiente mais sustentável e equilibrado ecologicamente para a população.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. G. **Análise da influência da distribuição temporal das chuvas intensas e de cenários de uso e ocupação de solo na quantificação dos prejuízos econômicos diretos provocados pelas inundações urbanas.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP. 162p. 2013.

AMORIM, H. A. A. **Afluências indevidas aos sistemas de drenagem de águas residuais.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 113p. 2007.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318 p. ISBN 858868631-7

BARBOSA, A.E.; FERNANDES, J.N.; DAVID L.M. Key issues for sustainable urban stormwater management. **Water Research**, Volume 46, Issue 20. 2012. Pgs 6787-6798, ISSN 0043-1354.

BELO HORIZONTE. Lei 7.166 de 27 de agosto de 1996. **Estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no Município,** Belo Horizonte 28 jul. 1996.

BELO HORIZONTE. Lei 8.137 de 21 de dezembro de 2000. **Altera as leis n° 7.165/96 e 7.166/96.** Belo Horizonte, 21 dez. 2000.

BELO HORIZONTE. Lei 9.959 de 20 de julho de 2010. **Altera as leis n° 7.165/96 e n°7.166/96.** Belo Horizonte, 21 jul. 2010.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 384 p. ISBN 9788579751608.

CANHOLI, J. F. **Medidas de Controle “in situ” do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas: Análises e Aspectos Técnicos e Legais.** 2013. 183 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 184 p, 2013.

CHAMPS, J. R. *et al.* **O Planejamento do Sistema de Drenagem Urbana na Cidade de Belo Horizonte.** 21° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES (2001). João Pessoa, PB, Brasil; 2001.

CHAMPS, J. R. Inundações urbanas em Belo Horizonte. Ocorrências, controle e medidas de proteção. **Revista Aqua-LAC** - Vol. 4 - Nº 2 - Set. 2012

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DEP. **Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual**. Department of Environmental Protection, 2006. 642 p.

EPA. **EPA Administered Permit Programs: the National Pollutant Discharge Elimination System**. U.S. Environmental Protection Agency – Code of Federal Regulations, 40 C.F.R. Washington DC, 1993.

EPA. **International Stormwater BMP Database**. 2018. Disponível em: <www.bmpdatabase.org>. Acesso em: 03 mai. 2018.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

JONES, P.; MACDONALD, N. Making space for unruly water: Sustainable drainage systems and the disciplining of surface runoff. **Geoforum**, n. 38. p. 534-544, 2007.

LIMA, R. R. M. **Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na cidade de Natal – Rio Grande do Norte**. 2011. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

LOURENÇO, R. **Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis**. 2014. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construção Urbana). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra – Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2014.

LUCAS, T. P. B., AUGUSTO, P., REIS, dos S., ROCHA, S.C., Impactos hidrometeorológicos em Belo horizonte MG. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 11 – Vol. 16 – JAN/JUL 2015.

MATOS, J. S. Aspectos Históricos e Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano. **Revista Engenharia Civil**, Lisboa, n. 16, p. 13-23, 2003.

METCALF & EDDY, Inc. Storm water management model: Volume I – Final Report. Universidade da Flórida, **Water Resources Engineers Inc.** EPA - Water Quality Office, Whashington, DC, 1971.

MOTA E. *et al.* ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (Org.). **PROJETO TÉCNICO: RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO**. Jaguaré: Fábrica de Ideias Brasileiras – Fib, 2012. 13 p. (Programa Soluções para Cidades).

MOTA E. *et al.* ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (Org.). **PROGRAMA DRENURBS Uma concepção inovadora dos recursos hídricos no meio urbano Belo Horizonte - MG**. Jaguaré: Fábrica de Ideias Brasileiras – Fib, 2012b. 13 p. (Programa Soluções para Cidades).

NAKAZONE, L. M. **Implantação de reservatórios de retenção em conjuntos habitacionais: a experiência da CDHU**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PAIVA, E.M.C.D., **Rede de Monitoramento Hidrológico**. In: Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Editora ABRH. p.493-506. Porto Alegre, 2001.

PBH. **DRENURBS**. 2018. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-e-infraestrutura/informacoes/diretoria-de-gestao-de-aguas-urbanas/drenurbs> > Acesso em: 31 mai. 2018.

POLETO, C. (2011). SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica. **Revista Thema**, pp.1-12.

PORTO, R.L. **Escoamento superficial direto**. In: TUCCI, C.E.M, PORTO, R. L. BARROS, M.T.L. Drenagem urbana. 1ª edição. Porto Alegre: ABRH/ UFRGS, 1995.

RIBEIRO, A. M. **BMP's em drenagem urbana: aplicabilidade em cidades brasileiras**. 2014. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

ROCHA, N. **Planejamento urbano da bacia Córrego Samambaia (Goiânia – GO) utilizando o SWMM – Stormwater Management Model**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil, Goiânia, GO, 2013.

ROSSMAN, L. A. **Storm water Management Model User's Manual Version 5.1**. EPA – National Risk Management Laboratory Office of Research and Development. Cincinnati, OH, 2015. 352 p.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1 – Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4. [S.I.], 2005. p. 5-18.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMP's**. Washington, DC: Water Resources Publications, 1987.

SMGM. Stormwater Management Guidance Manual. **Philadelphia Water**, v. 3. Filadélfia, PA, 2015. 698 p.

TOMINAGA, E. N. de S. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. In: TUCCI, C.E.M, PORTO, R. L.; BARROS, M.T.L. Drenagem urbana. 1ª edição. Cap1, p.15-36. Porto Alegre: ABRH/ UFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M.; *et al.* **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS, Volume II. 2000.

TUCCI, C. E. M. *et al.* **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, Saneamento para Todos, vol. 4, 194 p., 2005

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avançados** 22(63), p 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M.; *et al.* **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH; UFRGS, 2015.

VENTURIM, R. P.; BAHIA, V. G. Considerações sobre os principais solos de Minas Gerais e sua susceptibilidade à erosão. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 191, p 7-9, ago, 1998.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. 1975, **Hidrologia Aplicada**. Editora Mc Graw Hill, São Paulo, 245p.

WERNECK, G. **A BH das 200 enchentes**. 2012. Disponível em <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/01/07/interna_gerais,271132/a-bh-das-200-enchentes.shtml> Acesso em 11 abr. 2018.

WOODS-BALLARD, B. *et al.* **The SuDS Manual**. Reino Unido: CIRIA, 2015. 968 p.

APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE PRECIPITAÇÃO

Tabela A1: Distribuição temporal para um período de retorno de 2 anos

Tempo (min)	Intensidade (mm/hr)	Precipitação acumulada (mm)	Precipitação incrementada (mm)	Ordem	Reordenação	Precipitação (mm)
1	260.970424	4.349507067	4.349507067	1	30	0.496149408
2	230.888514	7.6962838	3.346776733	2	28	0.523505022
3	208.1801724	10.40900862	2.71272482	3	26	0.554697005
4	190.3248603	12.68832402	2.279315399	4	24	0.590621071
5	175.8522282	14.65435235	1.966028331	5	22	0.632476557
6	163.8419694	16.38419694	1.729844592	6	20	0.681906411
7	153.6861615	17.93005217	1.54585523	7	18	0.741221888
8	144.9657432	19.32876576	1.398713586	8	16	0.813777919
9	137.3816726	20.60725089	1.278485131	9	14	0.904630552
10	130.7143494	21.78572491	1.178474015	10	12	1.021755901
11	124.7985713	22.87973806	1.094013157	11	10	1.178474015
12	119.5074698	23.90149396	1.021755901	12	8	1.398713586
13	114.7418647	24.86073734	0.95924338	13	6	1.729844592
14	110.4230053	25.7653679	0.904630552	14	4	2.279315399
15	106.4875005	26.62187512	0.856507226	15	2	3.346776733
16	102.8836989	27.43565304	0.813777919	16	1	4.349507067
17	99.56905512	28.21123228	0.775579243	17	3	2.71272482
18	96.50818058	28.95245417	0.741221888	18	5	1.966028331
19	93.67137874	29.66260327	0.710149095	19	7	1.54585523
20	91.03352904	30.34450968	0.681906411	20	9	1.278485131
21	88.57322576	31.00062902	0.656119338	21	11	1.094013157
22	86.27210611	31.63310557	0.632476557	22	13	0.95924338
23	84.11432029	32.24382278	0.610717203	23	15	0.856507226
24	82.08610962	32.83444385	0.590621071	24	17	0.775579243
25	80.17546768	33.40644487	0.57200102	25	19	0.710149095
26	78.37186586	33.96114187	0.554697005	26	21	0.656119338
27	76.66602941	34.49971323	0.53857136	27	23	0.610717203
28	75.04975341	35.02321826	0.523505022	28	25	0.57200102
29	73.51575053	35.53261276	0.5093945	29	27	0.53857136
30	72.05752433	36.02876216	0.496149408	30	29	0.5093945

Tabela A2: Distribuição temporal para um período de retorno de 5 anos

Tempo (min)	Intensidade (mm/hr)	Precipitação acumulada (mm)	Precipitação incrementada (mm)	Ordem	Reordenação	Precipitação (mm)
1	304.6794428	5.077990714	5.077990714	1	30	0.579247728
2	269.5592194	8.985307314	3.907316601	2	28	0.611185038
3	243.0475375	12.15237688	3.167069563	3	26	0.647601256
4	222.201702	14.8134468	2.661069921	4	24	0.689542118
5	205.3050996	17.1087583	2.295311504	5	22	0.738407832
6	191.2832848	19.12832848	2.019570181	6	20	0.796116519
7	179.4265163	20.93309357	1.804765088	7	18	0.865366536
8	169.2455458	22.56607278	1.632979207	8	16	0.950074722
9	160.3912459	24.05868689	1.492614111	9	14	1.056143943
10	152.6072362	25.43453937	1.375852484	10	12	1.192886205
11	145.7006452	26.71178495	1.277245574	11	10	1.375852484
12	139.5233558	27.90467115	1.192886205	12	8	1.632979207

13	133.9595762	29.02457483	1.119903682	13	6	2.019570181
14	128.9173662	30.08071878	1.056143943	14	4	2.661069921
15	124.3227175	31.08067939	0.99996061	15	2	3.907316601
16	120.1153279	32.03075411	0.950074722	16	1	5.077990714
17	116.2455261	32.93623239	0.905478283	17	3	3.167069563
18	112.6719964	33.80159893	0.865366536	18	5	2.295311504
19	109.3600686	34.6306884	0.82908947	19	7	1.804765088
20	106.2804147	35.42680492	0.796116519	20	9	1.492614111
21	103.4080439	36.19281538	0.766010459	21	11	1.277245574
22	100.7215178	36.93122321	0.738407832	22	13	1.119903682
23	98.20233206	37.64422729	0.71300408	23	15	0.99996061
24	95.83442351	38.33376941	0.689542118	24	17	0.905478283
25	93.60377487	39.00157286	0.667803459	25	19	0.82908947
26	91.49809412	39.64917412	0.647601256	26	21	0.766010459
27	89.50655312	40.2779489	0.628774784	27	23	0.71300408
28	87.61957273	40.88913394	0.611185038	28	25	0.667803459
29	85.82864511	41.48384514	0.594711193	29	27	0.628774784
30	84.12618573	42.06309286	0.579247728	30	29	0.594711193

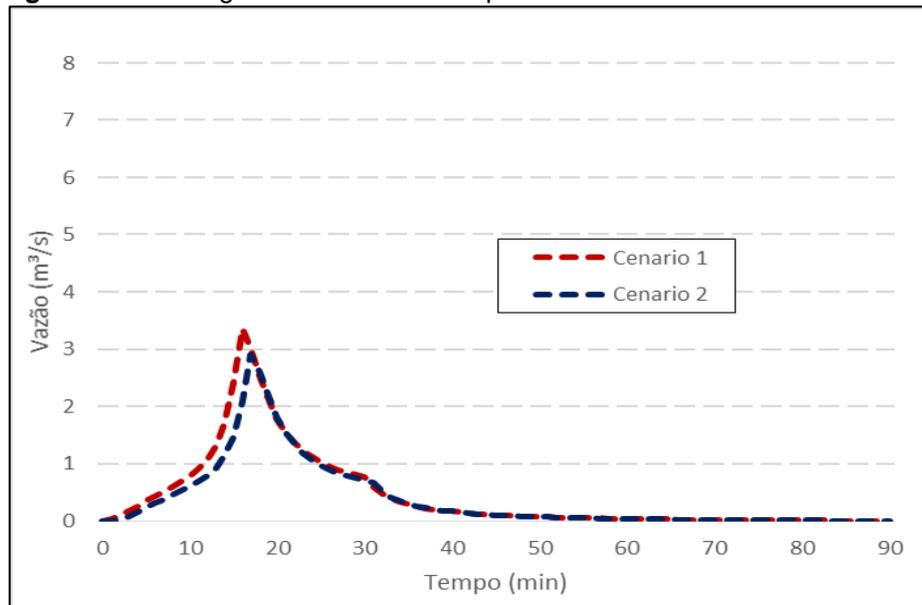
Tabela A3: Distribuição temporal para um período de retorno de 10 anos

Tempo (min)	Intensidade (mm/hr)	Precipitação acumulada (mm)	Precipitação incrementada (mm)	Ordem	Reordenação	Precipitação (mm)
1	342.5446761	5.709077935	5.709077935	1	30	0.651236012
2	303.0597491	10.10199164	4.392913703	2	28	0.687142457
3	273.2532239	13.6626612	3.56066956	3	26	0.728084443
4	249.8166904	16.65444602	2.991784827	4	24	0.77523767
5	230.8201965	19.23501637	2.580570348	5	22	0.830176363
6	215.0557656	21.50557656	2.27056019	6	20	0.895057023
7	201.7254507	23.53463591	2.02905935	7	18	0.972913358
8	190.2792001	25.37056002	1.835924106	8	16	1.068148985
9	180.3244974	27.0486746	1.678114586	9	14	1.187400375
10	171.5730993	28.59551655	1.54684195	10	12	1.341136819
11	163.8081645	30.03149683	1.435980279	11	10	1.54684195
12	156.8631683	31.37263365	1.341136819	12	8	1.835924106
13	150.6079281	32.63171776	1.259084106	13	6	2.27056019
14	144.9390777	33.81911813	1.187400375	14	4	2.991784827
15	139.7734111	34.94335277	1.124234639	15	2	4.392913703
16	135.0431316	36.01150176	1.068148985	16	1	5.709077935
17	130.692395	37.02951191	1.01801015	17	3	3.56066956
18	126.6747509	38.00242526	0.972913358	18	5	2.580570348
19	122.9512203	38.93455308	0.932127817	19	7	2.02905935
20	119.4888303	39.8296101	0.895057023	20	9	1.678114586
21	116.2594843	40.69081952	0.861209414	21	11	1.435980279
22	113.2390797	41.52099588	0.830176363	22	13	1.259084106
23	110.4068122	42.32261134	0.80161546	23	15	1.124234639
24	107.7446225	43.09784901	0.77523767	24	17	1.01801015
25	105.2367513	43.84864637	0.750797354	25	19	0.932127817
26	102.8693788	44.57673081	0.728084443	26	21	0.861209414
27	100.6303312	45.28364905	0.706918237	27	23	0.80161546
28	98.50883894	45.9707915	0.687142457	28	25	0.750797354
29	96.49533675	46.63941276	0.66862126	29	27	0.706918237
30	94.58129755	47.29064878	0.651236012	30	29	0.66862126

APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE VAZÕES DE ESCOAMENTO

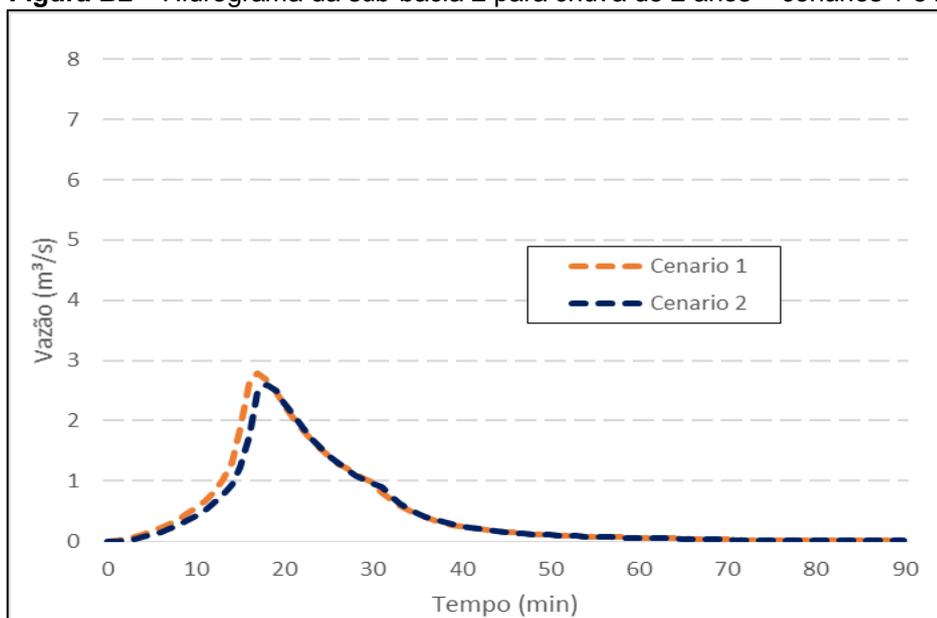
As Figuras B1, B2 e B3 exibem os gráficos referentes a comparação das vazões de escoamento das três sub-bacias discretizadas, para uma chuva com período de retorno de 2 anos, para os dois cenários de simulação.

Figura B1 – Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2

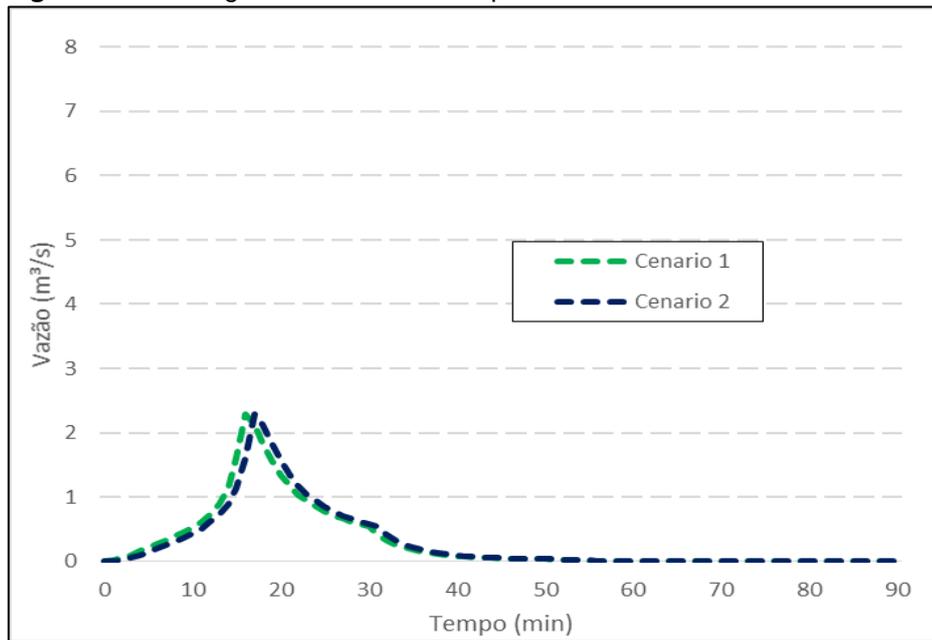


Fonte: Produção do autor.

Figura B2 – Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2

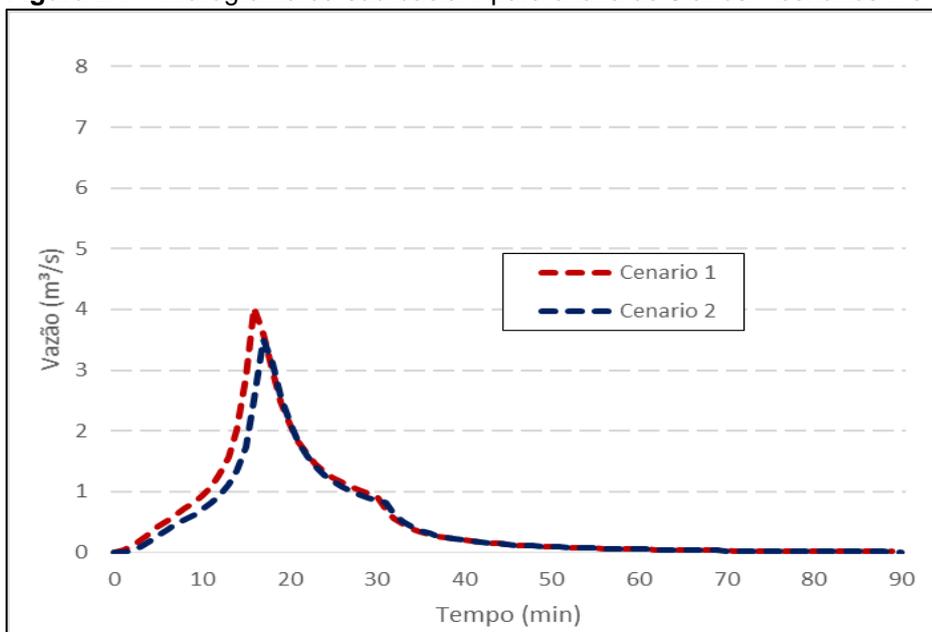


Fonte: Produção do autor.

Figura B3 – Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 2 anos – cenários 1 e 2

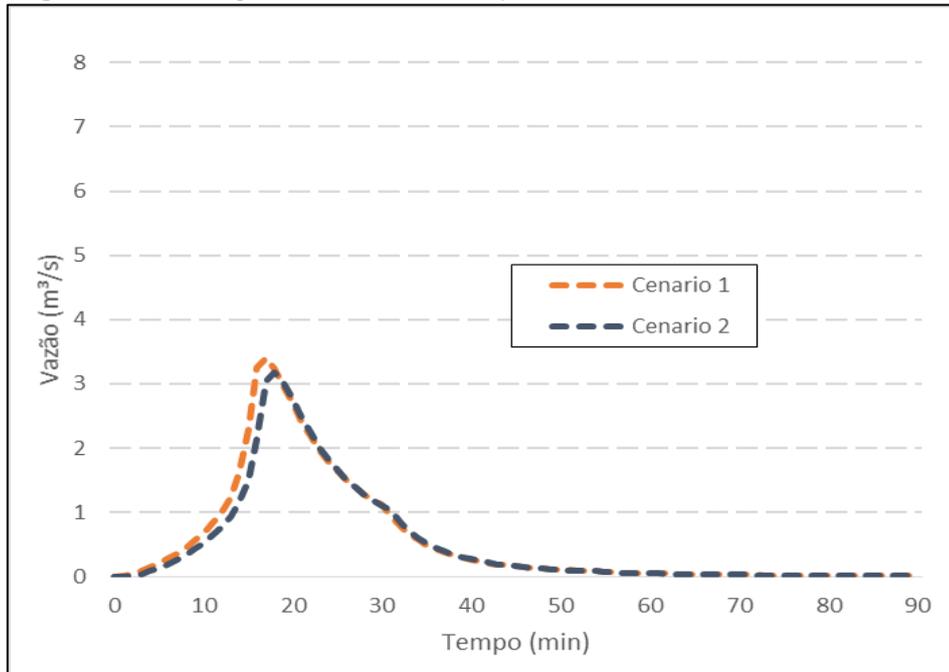
Fonte: Produção do autor.

As Figuras B4, B5 e B6 apresentam os gráficos referentes a comparação das vazões de escoamento das três sub-bacias discretizadas, para uma chuva com período de retorno de 5 anos, para os dois cenários de simulação.

Figura B4 – Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2

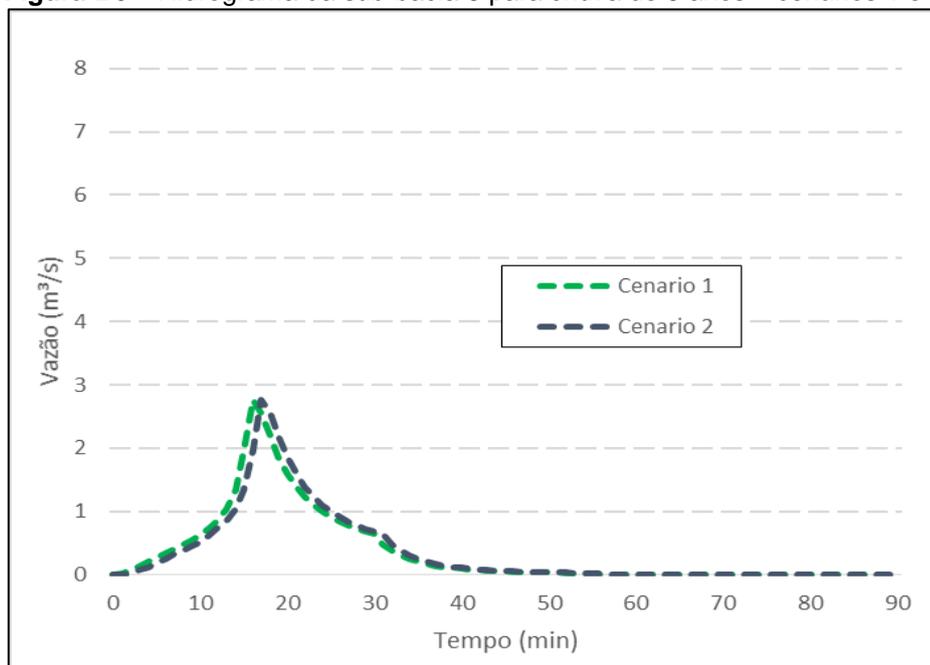
Fonte: Produção do autor.

Figura B5 – Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2



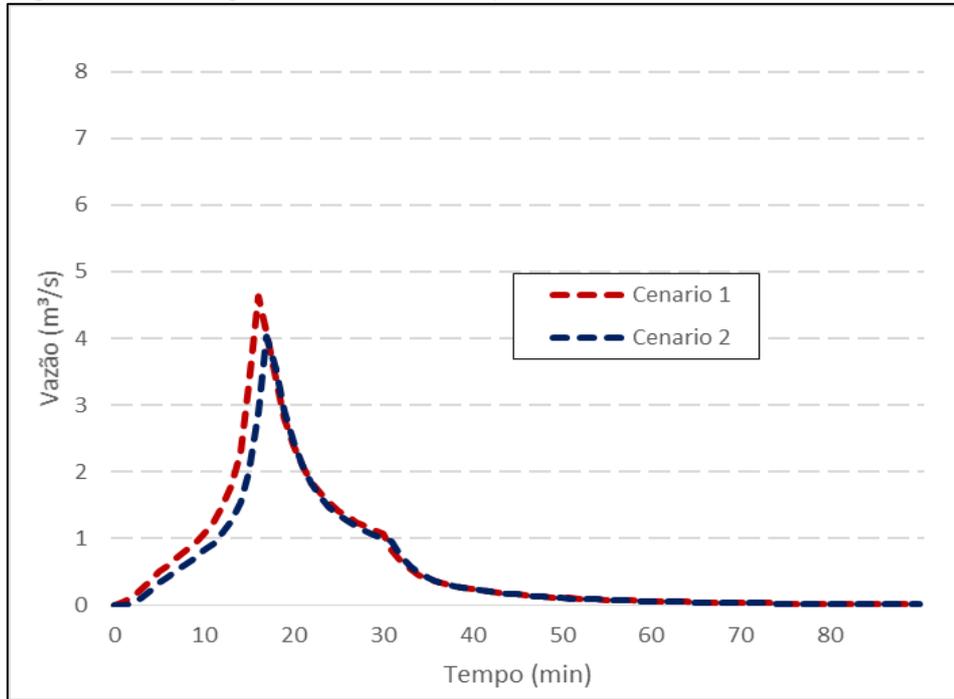
Fonte: Produção do autor.

Figura B6 – Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 5 anos – cenários 1 e 2

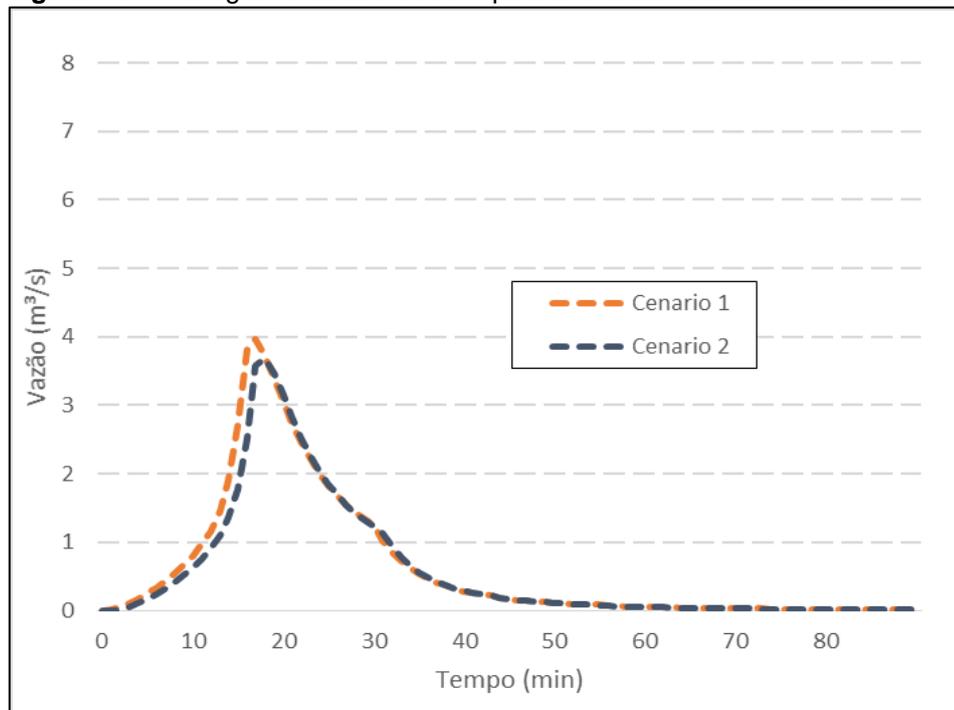


Fonte: Produção do autor.

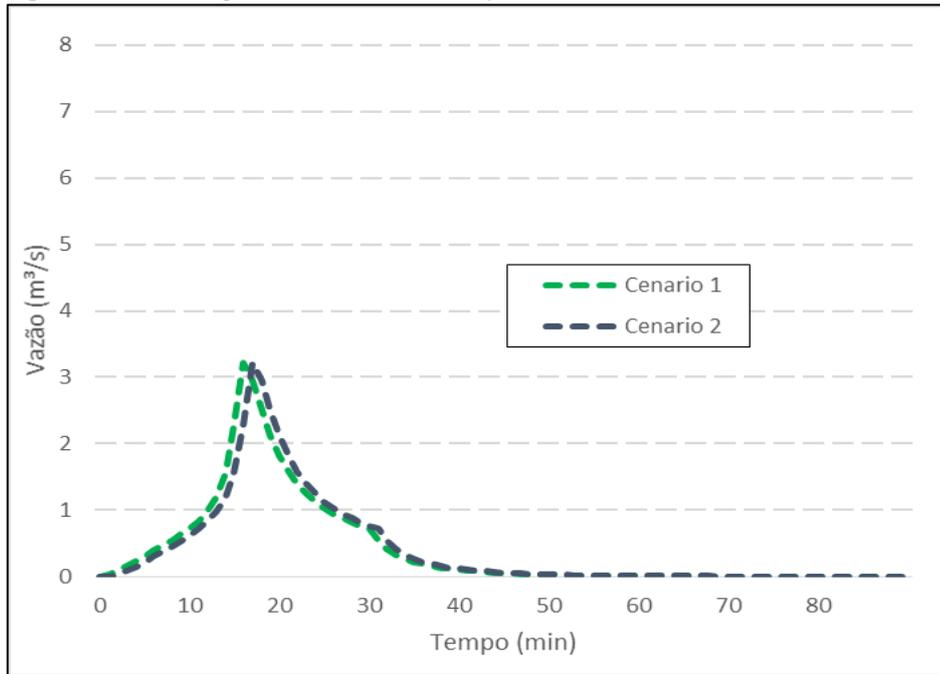
Por fim, nas Figuras B7, B8 e B9 são apresentados os gráficos referentes a comparação das vazões de escoamento das três sub-bacias discretizadas, para uma chuva com período de retorno de 10 anos, para os dois cenários de simulação.

Figura B7 – Hidrograma da sub-bacia 1 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2

Fonte: Produção do autor.

Figura B8 – Hidrograma da sub-bacia 2 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2

Fonte: Produção do autor.

Figura B9 – Hidrograma da sub-bacia 3 para chuva de 10 anos – cenários 1 e 2

Fonte: Produção do autor.