

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DO MESTRADO PROFISSIONAL
EM ENGENHARIA HÍDRICA**

**Aplicação do modelo SWMM para avaliação de soluções de baixo impacto na mitigação
de alagamentos: estudo de caso em Caxambu-MG**

Gisele Aparecida da Silva Santos

Itajubá, julho de 2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DO MESTRADO PROFISSIONAL
EM ENGENHARIA HÍDRICA**

Gisele Aparecida da Silva Santos

**Aplicação do modelo SWMM para avaliação de soluções de baixo impacto na mitigação
de alagamentos: estudo de caso em Caxambu-MG**

**Dissertação submetida ao Programa do Mestrado
Profissional em Engenharia Hídrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Hídrica.**

Área de Concentração: Gestão dos Recursos Hídricos

Orientador: Dr. Benedito Cláudio da Silva

**Julho de 2024
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DO MESTRADO PROFISSIONAL
EM ENGENHARIA HÍDRICA**

Gisele Aparecida da Silva Santos

Aplicação da ferramenta SWMM para avaliação de soluções a alagamentos: estudo de caso em Caxambu-MG

Dissertação aprovada por banca examinadora em 02 de julho de 2024, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia Hídrica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Orientador)

Profa. Marina Batalini de Macedo

Profa. Aná Floriano Vasconcelos

Itajubá

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por toda proteção a mim concedida e a quem amo sobre todas as coisas.

À Universidade Federal de Itajubá que contribuiu pela bagagem de conhecimento ao longo destes anos.

Ao meu orientador professor Benedito Cláudio da Silva, sem o qual não seria possível a realização do presente estudo. Por sua orientação, pela confiança, amizade, dedicação, paciência e apoio em todas as etapas do mestrado.

Às professoras Anaí, Marina e Samara que contribuíram com apontamentos valiosos para este trabalho.

Aos professores do mestrado pela dedicação em ensinar e estimular o conhecimento e difundir a ciência.

À DAC Engenharia, pela cessão das imagens aéreas.

À FAPEMIG pelo financiamento concedido pelo projeto APQ- 01598-21.

Ao NEIRU pela oportunidade de atuação em projetos que me propuseram o aprofundamento em áreas essenciais e correlatas ao objeto deste trabalho.

E aos meus familiares por todo apoio, em especial a minha mãe, pelo exemplo de coragem e dedicação, a quem sempre me espelhei para não desanimar diante das dificuldades.

RESUMO

As técnicas de baixo impacto (ou LID) são medidas que buscam a conservação e permeabilidade do solo ao associar os aspectos da natureza junto ao meio já urbanizado. Os processos de infiltração ou retenção dessas práticas contribuem para a redução de alagamentos. Nesse sentido, este estudo pretende avaliar, por meio de modelagem no software SWMM, a efetividade de aplicação dessas medidas na redução de alagamentos recorrentes na região central do município de Caxambu-MG. Para subsidiar a modelagem, foi determinada a chuva de projeto estimada por meio da análise de frequências de chuvas, ajustadas por funções de probabilidade e submetidas a testes de aderência pelo software ALEA. As precipitações diárias foram discretizadas pelo método de isozonas e distribuídas temporalmente pelo método de Huff 1º Quartil com probabilidade de excedência de 50%. O escoamento superficial foi estimado pelo método de onda dinâmica para transporte hidráulico e método CN-SCS para perdas de infiltração. A partir de dados característicos do local, obtidos por mapa de solo e levantamento aéreo por drone, foi modelado o cenário zero que representa a bacia com suas configurações atuais. Com a determinação da chuva crítica, foi realizada a calibração do cenário zero para tempo de retorno (TR) de 1 ano baseada no Curve Number, no coeficiente de Manning, parâmetros de armazenamento em depressão e dados de observação via ciência cidadã. Configurando-se como cenário referência, o cenário zero foi comparado aos dois cenários propostos, com implantação de técnicas LID nas proporções de 5,20% (Cenário 01 – Pavimentos permeáveis, jardim de chuva e telhados verdes em 50% das edificações com áreas) e 9,27% (Cenário 02 - Pavimentos permeáveis, trincheira e poço de infiltração, telhados verdes em 100% das edificações). Em geral, as técnicas LID contribuíram para redução da vazão a uma taxa média de 32,55% considerando 9,27% de inserção de LID na bacia. Na mesma proporção de LID, foi alcançado o desempenho hidráulico na redução do volume de escoamento à taxa média de 43,52%. Em geral, as técnicas LID avaliadas apresentaram bom desempenho para atuarem submetidas aos eventos de chuva de baixa intensidade (TR até 10 anos).

Palavras-Chave: Técnicas LID, técnicas de baixo impacto, Drenagem urbana, Modelo SWMM.

ABSTRACT

Low Impact Development (LID) are measures aimed at soil conservation and permeability by integrating natural aspects with already urbanized areas. The infiltration or retention processes of these practices contribute to the reduction of flooding. In this context, this study aims to assess, through modeling in the SWMM software, the effectiveness of applying these measures in reducing recurrent flooding in the central region of Caxambu-MG. To support the modeling, the design rainfall was determined through frequency analysis of rainfall, adjusted by probability functions, and subjected to adherence tests using the ALEA software. Daily precipitation was discretized using the Isozona method and temporally distributed using the Huff 1st Quartile method with a 50% exceedance probability. Surface runoff was estimated using the dynamic wave method for hydraulic transport and the CN-SCS method for infiltration losses. Based on site-specific data obtained from soil maps and aerial surveys by drone, the zero scenario was modeled, representing the basin with its current configurations. With the determination of the critical rainfall, the zero scenario was calibrated for a return period (RP) of 1 year based on the Curve Number, Manning's coefficient, depression storage parameters, and citizen science observation data. Serving as the reference scenario, the zero scenario was compared to two proposed scenarios with the implementation of LID techniques at proportions of 5.20% (Scenario 01 – Permeable pavements, rain gardens, and green roofs on 50% of the buildings) and 9.27% (Scenario 02 – Permeable pavements, trench and infiltration well, green roofs on 100% of the buildings). Overall, LID techniques contributed to a reduction in runoff at an average rate of 32.55% considering 9.27% LID implementation in the basin. At the same proportion of LID, hydraulic performance was achieved in reducing runoff volume at an average rate of 43.52%. Generally, the evaluated LID techniques showed good performance in managing low-intensity rainfall events (RP up to 10 years).

Keywords: LID techniques, Low Impact Development, Urban drainage, SWMM Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do impacto da urbanização no hidrograma.....	23
Figura 2 - Técnicas de baixo impacto.....	27
Figura 3 – Biovaleta	31
Figura 4 - Lagoa/Bacia de retenção	32
Figura 5 - Trincheira de infiltração.....	32
Figura 6 - Poço de infiltração	33
Figura 7 - Faixa gramada.....	34
Figura 8 -Pavimento permeável.....	35
Figura 9 - Jardim de chuva e biorretenção	35
Figura 10 - Canteiro pluvial	36
Figura 11 - Reservatório de lote	37
Figura 12 - Telhado verde	38
Figura 13 - Representação conceitual de uma bacia de infiltração	46
Figura 14 - Fluxograma da metodologia empregada.....	58
Figura 15 - Localização do município de Caxambu.....	59
Figura 16 - Hidrografia do município de Caxambu	60
Figura 17 - Pontos com deficiência em drenagem	62
Figura 18 - Alagamento na Avenida Camilo Soares	63
Figura 19 - Alagamento nas ruas Antônio Miguel Arnout (a) e João Carlos (b)	64
Figura 20 - Alagamento na interseção da Avenida Camilo Soares (a) e rua João Pinheiro (b).....	64
Figura 21 - Bacia Parque das Águas.....	66
Figura 22 - MDE da bacia de contribuição	66
Figura 23 - Localização dos postos pluviométricos de Caxambu-MG	69
Figura 24- Mapa de Isozonas e Coeficientes de desagregação do método de Isozonas.....	71
Figura 25 - Evento de chuva em dezembro/21	74
Figura 26 - Evento de chuva em dezembro/15	75
Figura 27 - Altura da mureta no trecho paralelo à pista (a) canto curvo (b)	75
Figura 28 - Altura da mureta de jardim existente no local	76
Figura 29 - Mapa de declividade da bacia Parque das Águas	77
Figura 30 - Mapa de solos da bacia Parque das Águas	78
Figura 31 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Parque das Águas.....	78
Figura 32 - Totais mensais médios registrados no Posto 2144003.....	80
Figura 33 - Ajuste de distribuições.....	82
Figura 34 - Hietogramas de projeto	83
Figura 35 - Discretização de sub-bacias da BHIPA	84
Figura 36 – Técnicas LID selecionadas para simulação da bacia	92
Figura 37 – Edificações com telhados selecionados para a inserção de telhados verdes	92
Figura 38 – Lâminas de água encontradas no cenário 00.....	96
Figura 39 – Hidrogramas obtidos para as diferentes durações de chuva.....	97

Figura 40 - Boxplot para diferentes tempos de retorno considerando a infiltração	98
Figura 41 - Boxplot para diferentes tempos de retorno considerando o escoamento total e armazenamento	99
Figura 42 - Escoamento na bacia no cenário 00 e cenário 01	101
Figura 43 - Comparação das lâminas d'água nos Cenários 00 e 01	101
Figura 44 - Bloxplot para os parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias em diferentes tempos de retorno no cenário 01	103
Figura 45 - Escoamento na bacia no cenário 00 e cenário 02	105
Figura 46 - Comparação das lâminas d'água nos Cenários 00 e 02	106
Figura 47 - Bloxplot para os parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias em diferentes tempos de retorno no cenário 02	107
Figura 48 - Lâminas de alagamento ao final dos eventos simulados nos cenários 01 (a) e 02 (b)	110
Figura 49 - Comparação da taxa de redução da vazão de pico (a) e do escoamento superficial (b) para diferentes tempos de retorno	111
Figura 50 - Tempo de resposta da bacia 8 e hidrograma do cenário 00, 01 e 02	112
Figura 51 - Tempo de resposta das bacias que possuem aplicação de conjuntos LID	113
Figura 52 - Taxa de variação do volume do escoamento superficial, armazenamento, infiltração e vazão em função do coeficiente de rugosidade (a) e CN (b)	118
Figura 53 - Taxa de variação do volume do escoamento superficial e vazão em função dos parâmetros %Zero-Imperv (a) e Dstore-Imperv (b)	119
Figura 54 - Localização das fontes minerais do Parque	123
Figura 55 - Lagoa em processo de assoreamento	123
Figura 56 - Formação de ilha em decorrência do depósito natural de sedimentos na lagoa ..	124
Figura 57 - Canal do ribeirão no nível máximo de escoamento – R. Antônio Miguel Arnaut	125
Figura 58 - Canal do ribeirão no nível máximo de escoamento – Av. Ápio Cardoso	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estudos de avaliação das técnicas LID baseados em modelagem computacional ...	56
Tabela 2 - Postos pluviométricos pertencentes ao município de Caxambu - MG.....	70
Tabela 3 - Características geomorfométricas da bacia	79
Tabela 4 - Tempos de concentração estimados para a bacia segundo métodos empregados ...	79
Tabela 5 - Precipitação máxima para cada ano hidrológico.....	80
Tabela 6 - Resultados dos testes de aderência.....	81
Tabela 7 - Relação entre as precipitações de 24h, 1h e 6 min segundo método das Isozonas .	82
Tabela 8 - Precipitações para as durações de até três vezes o TC da bacia (mm).....	83
Tabela 9 - Dados das sub-bacias.....	85
Tabela 10 - Profundidade de armazenamento em depressão.....	86
Tabela 11 - CN para cada de uso do solo	87
Tabela 12 - Parâmetros dos condutos	88
Tabela 13 - Parâmetros dos nós.....	89
Tabela 14 – Levantamento de área permeável tratada pelos telhados verdes	93
Tabela 15 –Área permeável e impermeável de contribuição da LID	93
Tabela 16 – Área permeável e impermeável tratadas pelas demais LID.....	94
Tabela 17 - Parâmetros das técnicas LID empregadas	94
Tabela 18 - Resultados da simulação da duração crítica	95
Tabela 19 - Escoamento superficial por sub-bacia no cenário atual para chuva crítica.....	100
Tabela 20 - Distribuição das técnicas LID em cada bacia no cenário 01	100
Tabela 21 - Infiltração e escoamento gerado para chuva crítica com TR 01 ano (cenário 01)	104
Tabela 22 - Distribuição das técnicas LID em cada bacia no cenário 01	104
Tabela 23 - Escoamento e vazão para chuvas com TR de 1 ano.....	108
Tabela 24-Infiltração e escoamento gerado para chuva crítica com TR 02 anos (Cenário 02)	109
Tabela 25 - Parâmetros variados com o tipo de solo da LID	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais termos associados à técnica de baixo impacto e sua origem.....	25
Quadro 2- Condutividades hidráulica dos solos recomendadas para a aplicação de medidas de infiltração.....	30
Quadro 3 – Aplicação e restrições de aplicação das técnicas de baixo impacto	40
Quadro 4 - Parâmetros essenciais para as técnicas LID	49
Quadro 5 - Equações do tempo de concentração adotadas no estudo	68
Quadro 6 - Método para pré-dimensionamento das técnicas LID.....	73
Quadro 7 - Aptidões e restrições das áreas disponíveis na bacia e LIDs adotadas para cada local	90

LISTA DE SIGLAS

LID: Low Impact Development

MOUSE: Modelo de Esgotos Urbanos

MUSIC: Modelo para Conceituação de Melhoria de Águas Pluviais Urbanas

HEC-HMS: Sistema de Modelagem Hidrológica

SWMM: Storm Water Management Model

MDT: Modelo Digital do Terreno

FUNASA: Fundação Nacional da Saúde

EUA: Estados Unidos da América

SuDS: Sustainable Urban Drainage System

LIUDD: Low Impact Urban Design and Development

WSUD: Water Sensitive Urban Design

BMPs: Best Management Practices

IUDS: Integrated Urban Drainage System

ATs: Alternative Techniques

GI: Green Infrastructure

ABC: Active Beautiful Clean

Nbs: Nature-based Solutions

NBR: Norma Técnica Brasileira

USEPA: U.S. Environmental Protection Agency

CADDIES: Cellular Automata Dual Drainage Simulation

IDF: Intensidade-Duração e Frequência

UPGRH: Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos

BHIPA: Bacia Hidrográfica incremental Parque das Águas

MDE: Modelo Digital de Elevação

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

UFV: Universidade Federal de Viçosa

UFLA: Universidade Federal de Lavras

CN: Curva Número

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

IGAM-MG: Instituto Mineiro de Gestão de Águas

ALEA: Análise de Frequência Local de Eventos Anuais

MOM: Método dos Momentos

MMV: Método da Máxima Verossimilhança

MML: Método dos Momentos L

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

TR: Tempo de retorno

PVd1: Argissolo Vermelho

PVAe7: Argissolo vermelho-amarelo

LVAd1: Latossolo vermelho-amarelo

CN-SCS: Curve Number – Soil Conservation Service

LISTA DE SÍMBOLOS

F_c : fator de colmatação [adim]

P_a : quantidade de chuva anual sobre o local [mm]

CR: taxa de captação do pavimento [%]

VR: índice de vazios do sistema [%]

ISF: fração de superfície impermeável [%]

T: espessura da camada do pavimento [cm]

q: descarga [mm/h]

C: coeficiente de drenagem [adim]

h: altura da água armazenada [mm]

Hd: altura da drenagem [mm]

T: altura do dreno acima do fundo da camada de armazenamento da estrutura [mm]

D: profundidade de água armazenada [mm]

$x(T)$: precipitação [mm]

α : parâmetro de escala [mm]

σ_x : desvio padrão amostral [mm]

β : parâmetro de posição [mm]

\bar{X} : média amostral [mm]

T: tempo de retorno [anos]

$\bar{X}_{\ln x}$: média dos logaritmos neperianos da amostra [mm]

$\sigma_{\ln x}$: desvio padrão amostral dos logaritmos neperianos da amostra [mm]

kT : fator de frequência, igual à variável normal central reduzida Z

γ : coeficiente de assimetria da distribuição Log-Pearson III

\bar{y} : média amostral [mm]

χ^2 : teste qui-quadrado

T_c : tempo de concentração [min]

A : área da bacia [km²]

A_{imp} : área impermeável [m²]

L : comprimento do talvegue [km]

S : declividade [m/m]

CN : número da curva SCS

P_{24h} : chuva de 24 h [mm]

$P_{1 \text{ dia}}$: chuva diária [mm]

I :intensidade [mm/h]

T_r : tempo de retorno [anos]

t :duração da chuva [min]

a,b,c : parâmetros da IDF local

q_s : vazão [m³/s]

A : área de contribuição [m²]

A_{pav} : área do pavimento [m²]

C : coef. escoamento da bacia [adim.]

A : área de contribuição do pavimento [m²]

V_a : volume de armazenamento [m³]

n : porosidade do material de enchimento [%]

H: espessura da camada de armazenamento [mm]

D: diâmetro do poço [m]

α : fator de colmatação

K_{sat} : condutividade hidráulica saturada do solo [$mm.h^{-1}$]

Y: razão entre a área de percolação e a área do dispositivo em planta, dividida por H [mm^{-1}]

Qs: vazão de saída constante do dispositivo [$mm.h^{-1}$]

L_a : comprimento da trincheira para solo com $k \geq 10^{-5}m/s$ [m]

L_b : comprimento da trincheira para solo com k entre 10^{-6} a $10^{-5}m/s$ [m]

$L_{c: pa}$: comprimento da trincheira para solo com k entre 10^{-6} a $10^{-7}m/s$ [m]

A: área de contribuição da trincheira [m^2]

C: coeficiente de escoamento da área que gera fluxo para a trincheira [adim.]

A_j : área em planta do jardim de chuva [m^2]

C: coeficiente de escoamento superficial da área de contribuição

A: área total ao jardim de chuva [m^2]

h_a : altura da camada de armazenamento superficial para locais cujo solo possui $k \geq 10^{-5}m/s$ [cm]

h_b : altura da camada de armazenamento superficial para locais cujo solo possui $k < 10^{-5}m/s$ [cm]

$n_{perm/imperm}$: coeficiente de Manning para área impermeável ou permeável [adim]

$\%_{imperm}$: percentual de área permeável/impermeável da bacia [%]

A_i : área da bacia [m^2]

n_i : coeficiente de Manning [adim]

$A_{classe\ uso\ do\ solo}$: área da classe de uso de solo [m^2]

A_{SB} : área total da sub-bacia [m^2]

n: quantidade de classes de uso de solo.[unid.]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM.....	21
3.2. TÉCNICAS DE BAIXO IMPACTO	24
3.2.1. Medidas estruturais	28
3.2.2. Medidas estruturantes	44
3.3. MODELO SWMM	45
3.3.1. Funcionamento do módulo LID.....	46
3.3.2. Técnicas LID presentes no modelo.....	47
3.3.3. Parâmetros das técnicas LID	47
3.4. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS PARA DETERMINAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS	52
3.5. ESTUDOS ANTERIORES	54
4. METODOLOGIA.....	58
4.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	58
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	59
4.2.1. Área de modelagem	61
4.3. BACIA HIDROGRÁFICA DE ESTUDO E PARÂMETROS	65
4.3.1. Declividade	67
4.3.2. Composição do uso e ocupação do solo	67
4.3.3. Composição pedológica.....	67
4.3.4. Tempo de concentração da bacia.....	68
4.4. ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS	69
4.4.1. Levantamento de dados pluviométricos	69
4.4.2. Estudo da série temporal.....	70
4.4.3. Desagregação e distribuição temporal da chuva.....	71
4.5. MODELAGEM NO SWMM	72
4.5.1. Tipos de LID selecionadas.....	72
4.5.2. Idealização dos cenários	74
4.5.3. Simulação e validação	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1. CARACTERÍSTICAS DA BACIA	77
5.2. CHUVA DE PROJETO.....	79
5.3. MODELAGEM SWMM	83
5.3.1. Construção do modelo	83
5.3.2. Dados do modelo	84

5.4. SIMULAÇÕES	95
5.4.1. Cenário 00 (atual)	95
5.4.2. Cenário 01	100
5.4.3. Cenário 02	104
5.4.4. Análise geral dos cenários	110
5.4.5. Considerações sobre a bacia da lagoa do Parque das Águas	122
6. CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS	129
ANEXO A - BACIA DO RIBEIRÃO BENGO.....	137
ANEXO B - ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DO SOLO	138

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano é um processo dinâmico e exige que a infraestrutura do município acompanhe a expansão das cidades para garantir a harmonia de convivência dos seres humanos com o meio. É nesse sentido que os processos de urbanização com ausência de planejamento do solo e da infraestrutura do sistema de drenagem têm influenciado a ocorrência de alagamentos nos centros urbanos. Essas intervenções antrópicas mal planejadas interferem nesse sistema acarretando consequências negativas sobre o meio ambiente, sobre os aspectos sanitários, paisagísticos e sociais (ZANANDREA; SILVEIRA, 2019).

Dentre essas consequências está a alteração do processo natural de infiltração da água que associado ao aumento da taxa impermeável do solo gera os escoamentos superficiais mais intensos decorrentes da ação antrópica sobre a bacia. O problema se torna ainda mais acentuado, quando a nível local, persiste um sistema de microdrenagem ineficiente, incapaz de oferecer o escoamento da água a tempo hábil que iniba a ocorrência dos alagamentos.

Diferente das inundações, os alagamentos são resultado da incapacidade de escoamento pluvial dos dispositivos de microdrenagem, seja pelo subdimensionamento, pela obstrução das galerias, ou pela ausência desse sistema. Consequência disso é a interdição de vias, acesso dificultado para pedestres e paralisação das atividades dos serviços locais (públicos e comerciais) atingidos pelos alagamentos.

A questão é que por muito tempo era comum a visão de que era necessário o afastamento imediato das águas pluviais das cidades. Dentre as diferentes fases da evolução do sistema de drenagem, Christofidis et. al.(2019) citam que na visão higienista, a ideia do afastamento não apenas das águas pluviais, mas também do esgoto gerado nos centros urbanos oferecia uma aparência mais higiênica às cidades. Porém essa visão trouxe consequências e impactos sobre o meio. Como resultado, atualmente a solução para amenizar o problema vem sendo a implementação de ações corretivas com a adoção de medidas estruturantes e estruturais. Embora eficazes, essas medidas esbarram no cenário da maioria dos centros urbanos, em que, consolidados e com ocupação densificada (ZANANDREA; SILVEIRA, 2019) podem encontrar dificuldades no processo de intervenção estrutural com a implementação de medidas que poderia ser minimizado se ações para mitigação do problema fossem previamente planejadas.

A mudança desse cenário exige repensar as estratégias de planejamento do solo que priorize ações de controle das águas pluviais na fonte impedindo que o escoamento se propague a jusante e sobrecarregue o sistema de escoamento. Aliado a isso, as técnicas compensatórias, assim denominadas no Brasil, ou as soluções de baixo impacto (*LID - Low Development Impact*), termo comumente empregado na literatura internacional, são técnicas que permitem o controle do deflúvio auxiliando o sistema de drenagem e prometendo reduzir os escoamentos a níveis consideráveis que justifiquem sua integração ao sistema de drenagem convencional.

O planejamento urbano aliado às técnicas LID diferencia-se do uso dos sistemas convencionais, pois quando desenhado ainda na fase de elaboração do projeto urbano, promove a continuidade do desenvolvimento urbano com a redução dos custos, permite a modulação do sistema de drenagem que responde à demanda do crescimento urbano, e promove a integração da drenagem pluvial com os parâmetros urbanísticas e paisagísticos (MORELLI; BARBASSA, 2009).

A simulação e avaliação da eficiência da implantação dessas medidas é apoiada pelo uso de ferramentas computacionais. Alguns modelos usados com frequência, como o Modelo de Esgotos Urbanos (MOUSE), Modelo para Conceituação de Melhoria de Águas Pluviais Urbanas (MUSIC), Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) e o Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais (SWMM) fornecem funcionalidades úteis para avaliar o efeito das práticas de LID no controle de alagamentos urbanas. O modelo SWMM é o sistema software mais comum devido sua disponibilidade pública, estrutura simples de ser aplicado (FILENI; COSTA; ALVES, 2019) e por ser um software de código aberto.

A metodologia por avaliação dos processos hidrológicos inserida nesses modelos mostra-se necessária ao planejamento urbano e tomadas de decisões (TEJADAS; POSSANTTI; MARQUES, 2019). Esses modelos auxiliam os gestores principalmente nos problemas mais complexos e que demandam múltiplas variáveis para processamento (SASAKI et. al., 2021).

Contudo, esses modelos necessitam ser alimentados com dados que caracterizam a bacia para que reflita a realidade encontrada quanto aos aspectos físicos (tipo solo, uso do solo, declividade) e hidrológicos (regime pluviométrico, dados de vazão), os quais nem sempre estão disponíveis ou possuem fácil acesso ao gestor. Uma medida alternativa para isso, é aplicar dados da literatura aos parâmetros passíveis de serem substituídos e buscar por informações secundárias que possam embasar as análises.

Propondo verificar a aplicabilidade da ferramenta com os dados disponíveis (ortofoto, MDT, tipo de solo, pluviometria e hidrografia), este estudo pretende avaliar a eficiência da simulação de cenários LID na redução de alagamentos recorrentes na região central do município de Caxambu - MG.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da implantação de soluções de baixo impacto na redução de alagamentos por meio de simulações geradas no software *Storm Water Management Model* (SWMM) na região central do município de Caxambu, MG. Como objetivos específicos, compete ao trabalho:

- Avaliar a área de estudo acerca de sua aptidão para a inserção das soluções de baixo impacto a partir dos dados de topografia, tipo e uso do solo;
- Propor soluções LID para serem implementadas a fim de reduzir os alagamentos;
- Avaliar as soluções LID passíveis de serem aplicadas no município;
- Avaliar o comportamento das soluções LID em face à intensidade das chuvas; e
- Avaliar a aplicação das técnicas em conjunto;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Concepção do sistema de drenagem

O sistema de drenagem urbana é composto por rede de coleta de água pluvial sobre as superfícies urbanas que por vezes oferece tratamento e destinação da água aos rios (TUCCI, 2005). Também é constituído pelo conjunto de infraestrutura de detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias.

Esse serviço é dividido segundo suas dimensões em sistema de microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem é constituída por rede primária de condutos pluviais a nível de loteamento (TUCCI, 1995). Composta por dispositivos coletores, abrange a rede de coleta e afastamento das águas através de galerias com diâmetros de dimensões pequenas e médias, sempre inferiores a 1,5 m (FUNASA, 2016). Seus dispositivos constituem-se de sarjetas, sarjetões, bocas de lobo, bocas de leão, caixas com grelhas, ralos, rampas, escadas hidráulicas e bueiros (BOTELHO, 2017). Esse conjunto de dispositivos é regularmente projetado para atender eventos de precipitações com risco moderado (CALDEIRA; LIMA, 2020).

A macrodrenagem compõe-se das estruturas destinadas à condução da água captada pela rede primária (TUCCI, 1995). É conceituada como um sistema de coleta pluvial urbana formando troncos coletores de grandes dimensões (CALDEIRA; LIMA, 2020). A esta característica incluem-se as galerias de portes maiores (diâmetro superior a 1,5m), os corpos receptores, além dos canais e rios canalizados (FUNASA, 2016). Como regra básica, o sistema de macrodrenagem busca evitar as enchentes por meio da construção de canais capazes de transportar maior volume de água do que o canal natural e por meio de reservatórios de amortecimento de ondas de cheias (TUCCI, 2012)

A principal função de um sistema de drenagem reside na prevenção a inundações e alagamentos, principalmente nas localidades situadas em áreas mais baixas ou próximas dos cursos naturais de água, as quais estão sujeitas a riscos. Sob este conceito é importante destacar a distinção das terminologias relacionadas a essa temática. De acordo com o caderno temático para assuntos de sistema de saneamento básico da Fundação Nacional da Saúde (FUNASA), um alagamento consiste na retenção momentânea de água nas vias em função da ineficiência do sistema de drenagem. O termo enchente é empregado para referenciar o aumento do nível de um curso d'água que não chega ao extravasamento, enquanto a inundação corresponde ao transbordamento da água do corpo hídrico atingindo a planície ou área de várzea.

Em relação à ocorrência de enchentes em áreas urbanas, Cordeiro (1992) *apud* Maia (2009) propõe termos para sua classificação em função da duração e área de abrangência do evento:

- Enxurradas: são resultado da ocorrência de cheias que apresentam picos intensos de chuva e ocorrem em bacias com pequenas dimensões, particularmente as bacias montanhosas e bacias urbanas com má drenagem;
- Cheias comuns: também denominadas por enchentes, são resultado de chuvas frontais com longa duração, apresentando altos índices de escoamento superficial.
- Enchentes com repique: são resultado de chuvas duradouras registrando pequenos intervalos sem chuva. Tem abrangência em bacias com maiores dimensões.

Contudo, não apenas a intensa e duradoura precipitação causará a enchente, para as cheias comuns. Tucci (1995) aponta as causas das enchentes são consequências de dois processos: as enchentes que ocorrem em áreas ribeirinhas e as enchentes provocadas pelo processo intensivo de urbanização.

As enchentes ribeirinhas ocorrem em áreas naturalmente inundáveis que são ocupadas indevidamente pela população diante da ausência de planejamento do uso do solo e de dispositivos legais impedindo essa prática. Esses eventos também estão condicionados à invasão de áreas ribeirinhas pela população de baixa renda e pela ocupação de áreas de médio risco com baixa frequência de ocorrência de inundação (TUCCI, 1995), que por apresentar um falso risco são locais atrativos para o assentamento irregular de moradias.

As enchentes decorrentes do processo de urbanização estão associadas à impermeabilização do solo que ocorre pela inserção da infraestrutura das cidades (telhados, pavimentação, pátios, calçadas). Devido à ausência de infiltração há um aumento do escoamento superficial e, a água que infiltrava de forma lenta no solo, passa a escoar nos condutos exigindo maior capacidade de escoamento das seções levando ao transbordamento dos canais (TUCCI, 1995). A consequência desse processo de urbanização é o aumento da vazão máxima, representado na configuração do hidrograma da bacia modificada pelo processo de urbanização que apresenta maiores registros de vazões quando comparada ao hidrograma da bacia natural (Figura 1). Essa diferença também é explicada pela associação das precipitações intensas ao cenário de solo impermeabilizado de modo que, as chuvas mais intensas tendem a gerar hidrogramas com maiores pronunciamentos devido ao aumento do escoamento

superficial, enquanto chuvas com menores intensidades tendem a gerar hidrogramas mais atenuados (COLLISCHON; DORNELLES, 2013).

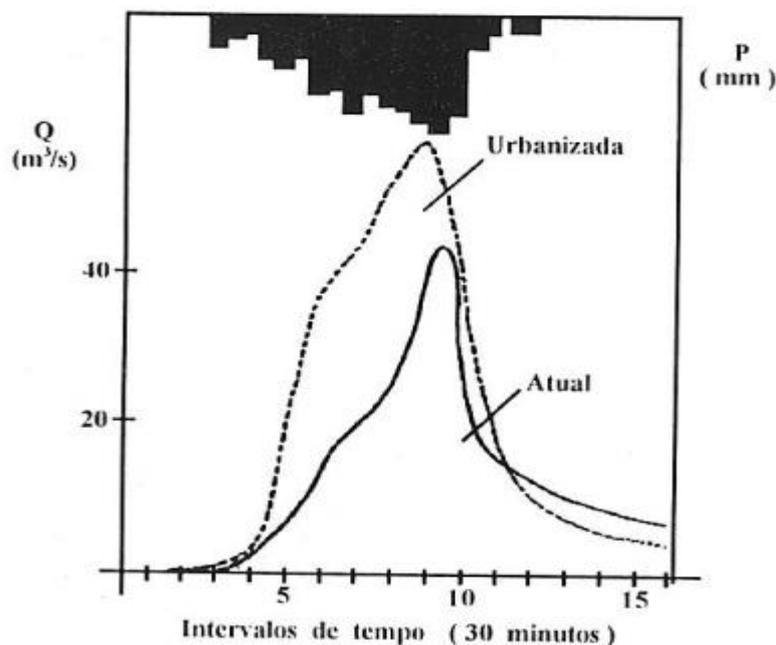


Figura 1 - Representação do impacto da urbanização no hidrograma
Fonte: Tucci (1995)

Especificando a ocorrência de alagamentos, estes possuem causas que estão relacionadas a má gestão do sistema de drenagem e a ineficiência de projetos. A infraestrutura de drenagem demanda manutenção e limpeza, pois o acúmulo de detritos pode alterar sua capacidade de escoamento. Ao longo do tempo, as modificações no uso do solo afetarão a dinâmica de escoamento, que deve ser compatível com a capacidade de escoamento tanto da infraestrutura como da bacia para não impactar a jusante. Portanto, não basta aumentar a capacidade de captação dos dispositivos de microdrenagem e rede de coleta pluvial se a jusante (galerias, canais, áreas de deságue) não possui capacidade de suporte. Paula *et. al.* (2017) relata que a dificuldade de planejamento e a organização entre os respectivos órgãos ligados ao gerenciamento do sistema de drenagem (manutenção e execução) são outros fatores que também contribuem para a deficiência no sistema.

Em função disso, pode-se enumerar os variados problemas decorrentes das redes de drenagem que não atendem as especificações requeridas: o subdimensionamento dá origem às posteriores inundações impactando negativamente população em termos de saúde e perdas econômicas (PAULA *et. al.*, 2022).

Botelho (2017) elenca algumas indicações para que o sistema de drenagem urbana tenha condições para ser bem operado, dentre elas, a localização adequada dos dispositivos de microdrenagem, priorizando a condução eficiente da água aos dispositivos de captação (1); a limpeza regular dos dispositivos de microdrenagem (2); o combate às deteriorações do sistema que priorize manutenção das bocas de lobo e poços de visita com tampas danificadas (3); e o cadastro da rede, incluindo todas as instalações (4) de modo a permitir o conhecimento de todas as particularidades do sistema facilitando futuras manutenções ou intervenções de melhorias.

Partindo do pressuposto de que é importante garantir o controle sobre o processo de construção em qualquer empreendimento, priorizar o controle de qualidade de execução da obra também é essencial para garantir a boa operação do sistema, além de minimizar os custos com materiais e possíveis retrabalhos. Assim, a atuação da mão de obra especializada e a aplicação de técnicas corretas de execução resulta em sistemas mais eficazes favorecendo a condutividade hidráulica e evitando a retenção de água em pontos com dificuldade de escoamento (PAULA et. al., 2017).

Para mitigação dos riscos a eventos de alagamentos, são adotadas algumas medidas, dentre elas as medidas convencionais, compostas por estruturas de rede de drenagem que captam a água pluvial e conduzem ao corpo receptor ou estação de tratamento (TUCCI, 2005) e as medidas não convencionais, compostas por estruturas, dispositivos e obras que diferem do conceito tradicional (priorização da canalização do escoamento). Dentre as medidas não convencionais, há aquelas que promovem os processos de infiltração, retenção do fluxo de água em reservatórios ou retardo do fluxo ao longo dos corpos hídricos (CANHOLI, 2005), cabendo aqui realçar um destaque para as soluções de baixo impacto.

3.2. Soluções de Baixo Impacto

Quando se trata da integração da drenagem urbana ao meio ambiente é possível identificar as tecnologias que auxiliam na mitigação dos impactos de precipitações sob referência de variados termos, dentre elas, as técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) difundida nos EUA, os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SUDS) difundido na Europa (FARIA et. al., 2022), além de outros termos como as Técnicas compensatórias, a Infraestrutura verde, as Cidades-esponjas, o Controle na fonte, as Soluções baseadas na natureza e o Design urbano sensível a água (FERRANS et. al., 2022). As origens de algumas dessas medidas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais termos associados à técnica de baixo impacto e sua origem

Modelo	Origem	Região
Low Impact Development (LID) Low Impact Urban Design and Development (LIUDD)	Final dos anos 1970 (LID) e 1990 (LIUDD)	EUA e Nova Zelândia
Water Sensitive Urban Design (WSUD)	Década de 1990	Austrália
Integrated Urban Drainage System (IUDS)	Final dos anos 1970	Suíça
Best Management Practices (BMPs)	Anos de 1972	EUA e Canadá
Sustainable Urban Drainage System (SuDS)	Final da década de 1980	Reino Unido
Alternative Techniques (ATs)	Início da década de 1980	França
Green Infrastructure (GI)	Década de 1990	EUA
Active Beautiful Clean (ABC) Waters Program	2006	Singapura
Sponge City's	2012	China
Nature-based Solutions (Nbs)	2015	Europa

Fonte: Adaptado de Mendes e Santos (2021)

Mendes e Santos (2021) classificam essas medidas como sendo um conjunto de técnicas de baixo impacto ambiental para controle e gerenciamento das águas pluviais cuja finalidade é se tornar uma alternativa ao sistema convencional de drenagem para o gerenciamento dos riscos ambientais. No Brasil a técnica LID é o termo mais difundido para se referir às tecnologias de integração da drenagem urbana ao meio ambiente (PEDROSA, 2021).

Dentre as medidas mais comuns pode-se destacar os jardins de chuva, pavimentos permeáveis, telhados verdes, bacias de retenção, entre outros. A principal função das técnicas LID é buscar reestabelecer as condições hidrológicas de pré-desenvolvimento do local, para que por meio do armazenamento, da infiltração, e da evaporação o escoamento superficial seja reduzido (MORELLI; BARBASSA, 2009).

Além disso, essas medidas tornam-se mais promissoras ao passo que reduzem os custos de implantação em um cenário que sempre busca a viabilidade econômica e a redução de custos. No Brasil, em municípios de médio e grande porte, o custo final dos projetos de drenagem sustentável como complemento aos sistemas tradicionais é inferior ao custo dos projetos exclusivamente convencionais (MOURA; SILVA, 2015). “Os estudos evidenciam que a adoção de modelos dessa natureza traz, além da melhoria ambiental e hidrológica, economia na implantação e manutenção das infraestruturas” (MENDES; SANTOS, 2021).

Por meio de uma análise panorâmica do emprego das técnicas LID, embora possa haver divergências na concepção das tecnologias, em sua maioria, os custos de implementação dos sistemas sustentáveis são mais baixos que os custos com os sistemas tradicionais (MENDES; SANTOS, 2021). Segundo Mendes e Santos (2021), as ações que mais influenciam nos custos dessas técnicas estão relacionadas à aquisição de material vegetal, técnicas de urbanismo e habitação, correções no solo, preparação do local, uso de drenos subterrâneos e conexões com sistemas convencionais de drenagem. Contudo, o maior empecilho para sua aplicação é a disponibilidade de áreas públicas e aceitação dos proprietários de imóveis, já que a depender da técnica perde-se espaço no terreno.

As técnicas de baixo impacto podem ser divididas em medidas estruturais e não estruturais (Figura 2). Entende-se por medidas estruturais àquelas responsáveis por intervenção no meio as quais demandam espaço, recursos materiais e tecnologia, enquanto as medidas não estruturais, estão associadas a implementação de medidas imateriais, não necessitando de recursos físicos ou obras civis para serem implementadas. As medidas não estruturais envolvem ações com intuito de modificar padrões de comportamento da população, por meio de dispositivos legais, sanções econômicas e programas educacionais (ROCHA; RIBEIRO, 2018). Ou ainda por meio de ações de fiscalização e controle de gestão que priorize pelos processos de melhoria constante no gerenciamento do setor.

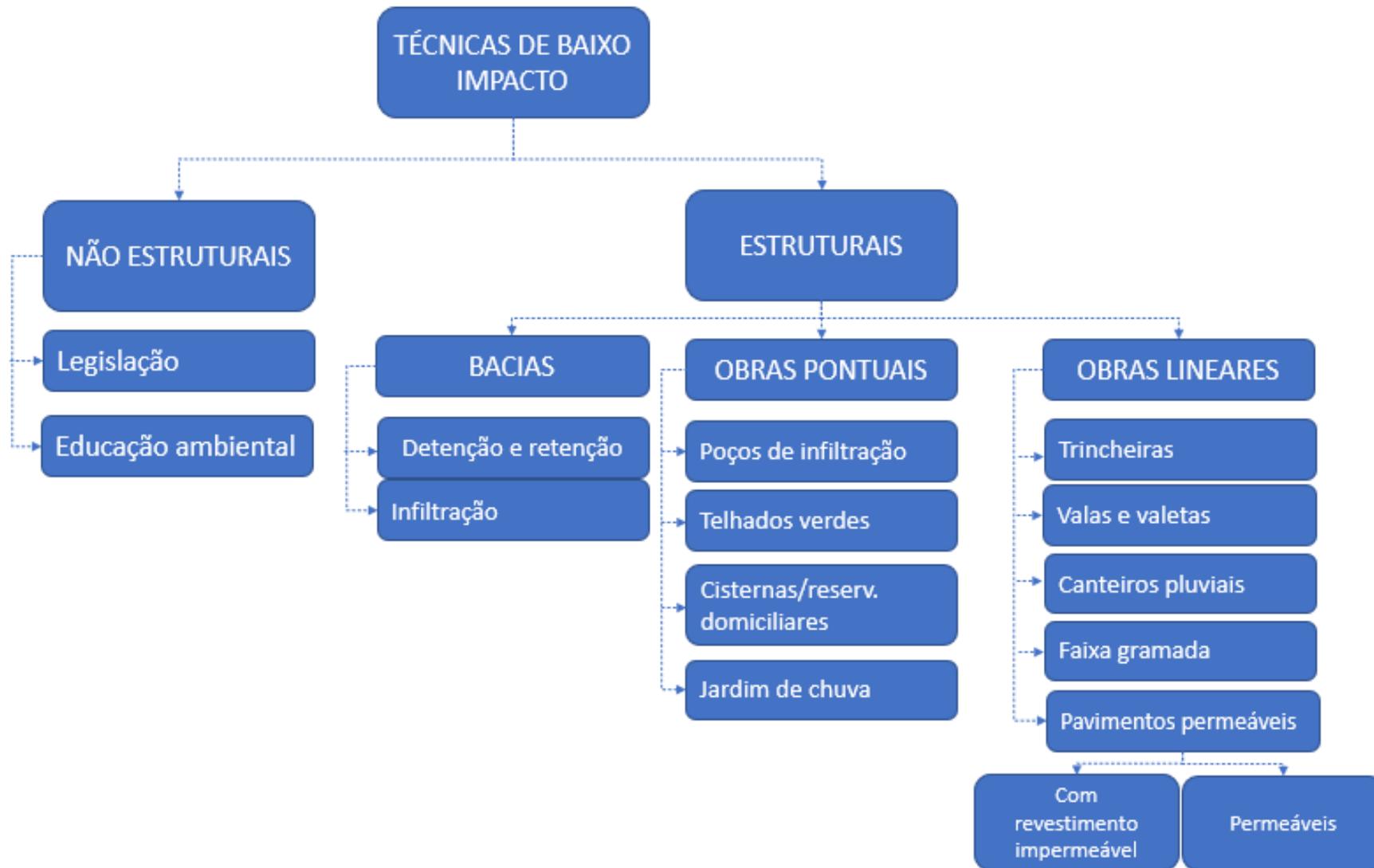


Figura 2 - Técnicas de baixo impacto
 Fonte: Adaptado de Baptista; Nascimento; Barraud (2015) *apud* Lechi e Silva (2021)

3.2.1. Medidas estruturais

Dentre as medidas estruturais, as técnicas compensatórias podem ser ainda divididas em medidas que auxiliam o processo de infiltração e as medidas que priorizam os processos de armazenamento ou retenção de água.

3.2.1.1. Técnicas de baixo impacto de infiltração ou percolação

Sob o ponto de vista da contribuição para o sistema de drenagem urbana, o estudo da infiltração e da dinâmica da água no solo permite quantificar a proporção do escoamento superficial e orienta as análises da frequência e intensidades das cheias (COLLINSCHON; DORNELLES, 2013). Essas análises permitem definir as melhores alternativas de infraestrutura operacional dos sistemas de drenagem, colaborando com a definição dos parâmetros de projeto que busquem a eficiência da infraestrutura, uma vez que o escoamento superficial apresenta expressiva importância no dimensionamento e controle da água pluvial. Além de contribuir com os aspectos de projeto, o processo de infiltração tem um importante papel na redução dos escoamentos superficiais, na recarga dos aquíferos e rios alimentados por recarga subterrânea.

As superfícies de infiltração constituem-se na forma mais simples de descarte da água pluvial permitindo que a água escoada dos telhados e superfícies de captação sejam descarregadas em superfície em que o terreno é vegetado (CANHOLI, 2005). Para isso, as tubulações do sistema de captação pluvial são desconectadas do sistema de drenagem convencional favorecendo o processo de infiltração no terreno (ALMEIDA et. al., 2017).

Já os sistemas de biorretenção integram a vegetação ao sistema de drenagem aliando sua utilidade ao aspecto visual do paisagismo. Esses sistemas são estruturas que possuem capacidade de infiltração e/ou retenção e possuem composição associada à vegetação. Como práticas de biorretenção, Silva et. al. (2020) cita os jardins de chuva, os canteiros e lagoas pluviais, além dos biofiltros e trincheiras mistas (DANIEL JÚNIOR, 2013; PAUS & BRAKEREUD apud SILVA et. al., 2020).

Os aspectos de eficiência desses sistemas estão associados à redução do escoamento superficial e à melhoria da qualidade da água devido a retenção de sólidos em suspensão, nutrientes, metais pesados e coliformes fecais nestas estruturas (SILVA et. al., 2020), tornando essa alternativa potencial para minimizar a contaminação do solo e lençóis freáticos.

Entretanto, os sistemas de biorretenção apresentam algumas limitações, a saber: a necessidade da infraestrutura de drenos, manutenções com maiores frequência e substituição do solo argiloso que tem baixa capacidade de percolação (SILVA *et. al.*, 2020).

O baixo desempenho desses sistemas também pode estar relacionado às características do terreno, como profundidade do lençol freático, presença de solo colapsível, leito de rocha aflorante (superficial) e altas declividades (MOURA, 2013). A explicação para isso está no fato de que para solos com lençol freático raso as condições de saturação não favorecem o processo de infiltração do solo. Condição está, semelhante à presença de leito de rocha superficial que pela natureza impermeável, favorece o escoamento subsuperficial e superficial impedindo o processo de infiltração para camadas mais profundas.

Já os solos colapsíveis estão sujeitos ao fenômeno de *piping* (erosão interna), situação que inviabiliza as soluções por infiltração. Para tanto, os projetos de implementação das medidas de infiltração devem preceder a realização de ensaios de colapsividade do solo segundo as especificações da NBR 14.114/22. A declividade do terreno também afeta o processo de infiltração, pois a alta declividade aumenta a velocidade do escoamento superficial e dificulta a infiltração da água no solo, impactando assim o desempenho dos sistemas de infiltração.

Assim como as demais técnicas de infiltração, os processos de colmatação do solo e do meio filtrante também contribuem para a redução da eficiência dessas estruturas. Esse processo ocorre em função da deposição de material e sedimentos que reduzem a capacidade de infiltração e a atenuação do deflúvio. Para evitar os riscos de colmatação e poluição, essas estruturas podem ser projetadas com sistemas de pré-tratamento, com a aplicação de dispositivos de decantação, gradeamento, desarenação e retenção de óleos e graxas (MOURA, BARRAUD e BAPTISTA, 2009).

Nas medidas de infiltração em geral, capacidade de infiltração depende da capacidade hidráulica-operacional desses sistemas. Nos solos com baixa infiltração, a formação de lâmina da água na superfície pode gerar problemas sanitários propiciando o desenvolvimento das larvas do mosquito da dengue. Os autores Moura, Barraud e Baptista (2009) abordam os limites e as recomendações da condutividade hidráulica do solo que pode ser considerada para a aplicação das medidas de infiltração prescritas por diferentes autores (Quadro 2).

Quadro 2- Condutividades hidráulica dos solos recomendadas para a aplicação de medidas de infiltração

Autor	Condutividade Hidráulica do solo recomendada (K)
Azzout et al. (1994)	$K > 10^{-6}$ m/s
Grand Lyon (2007)	$10^{-5} < K < 10^{-2}$ m/s, para $K > 10^{-2}$ m/s devem ser adotados sistema de pré-tratamento e não é indicado a aplicação de poços de infiltração
Donovan (2003)	$K > 10^{-7}$ m/s
Wong (2006)	$10^{-5} < K < 10^{-8}$ m/s.
Barraud et al. (2006)	Para solos com condutividade hidráulica elevada ($K > 10^{-7}$ m/s) devem ser tomadas precauções para evitar que as camadas inferiores/lençol freático recebam a poluição rápida em função da velocidade de infiltração que acelera a percolação e não oferece tempo suficiente para a filtragem (retenção de partículas) e adsorção e precipitação (retenção de metais pesados).

Fonte: Adaptado de Moura, Barraud e Baptista (2009)

O escoamento superficial pode carrear partículas e resíduos que acabam causando riscos de poluição do lençol freático. Os riscos são ainda maiores com os solos de maior porosidade e aos solos com caminhos preferenciais (fissuras existentes) que favorecem a circulação rápida da água no solo (MOURA, BARRAUD e BAPTISTA, 2009). A variação da umidade do solo argiloso pode formar fissuras, por vezes com espessuras centimétricas, que acabam favorecendo a passagem da água por caminhos preferenciais sem passar pelo processo de filtragem (MOURA, BARRAUD e BAPTISTA, 2009). Portanto, para esse tipo de solo em locais que sofrem com a variação da temperatura, seria interessante a substituição do solo e a análise de presença do lençol freático, buscando a instalação da LID em locais com baixa interferência do nível de água (locadas a pelo menos 1 metro acima do N.A.).

A seguir são apresentadas as principais características das técnicas de infiltração:

- Biovaletas, valas ou valetas abertas de infiltração

São depressões escavadas no solo locadas preferencialmente nas adjacências de vias e estradas ou estacionamentos. Brito (2006) diferencia as valas das valetas pelas características estruturais, enquanto as valas são obras de larguras espessas e baixa declividade longitudinal, as valetas constituem-se de estruturas de pequena profundidade (BRITO, 2006).

Essas medidas podem ser formadas por estruturas sem revestimento, semelhante a pequenos canais naturais ou revestidas com vegetação. A vegetação (Figura 3) tem por

finalidade a proteção do solo da colmatção de partículas sólidas finas que dificultam a percolação da água (ALMEIDA *et. al.*, 2017). Lourenço (2014) recomenda que a vegetação adotada nesse tipo de estrutura seja relva ou plantas rasteiras, adaptadas ao tipo de escoamento previsto, ao solo e ao clima. Não se aconselha o uso de plantas de folha caduca (perdem totalmente as suas folhas durante determinado período), pois há risco de obstrução de eventuais dispositivos de regulação de caudais (LOURENÇO, 2014).

As valas de infiltração também podem ser constituídas de pequenas barragens que promovem a desaceleração do escoamento, permitindo assim, a infiltração e evitando a erosão de sua estrutura (AGOSTINHO; POLETO; 2012).



Figura 3 – Biovaleta
Fonte: Hannes *et. al.* (2015)

- Lagoas de infiltração e bacias de retenção:

As lagoas de infiltração são pequenos reservatórios com nível permanente de água (ALMEIDA *et. al.*, 2017). Reservatórios com a mesma função, porém com maiores dimensões são classificados como reservatórios ou bacias de retenção (Figura 4) sendo bem empregadas para compor o paisagismo de áreas urbanizadas. Possuem como vantagem a instalação em áreas públicas, como praças, quadras, parques que permite serem utilizados após os eventos de precipitações evitando a inutilização de áreas (AGOSTINHO; POLETO, 2012).

Estas estruturas permitem o controle, a regularização e o armazenamento de águas pluviais a fim de amortizar os escoamentos da bacia. Além disso, as bacias podem ser eficazes para amenizar os problemas de eventos extremos: as secas e as cheias, ao passo que reduz os

índices de escoamento superficial e retém água que se tratada adequadamente pode ser reutilizada para fins menos nobres (LOURENÇO, 2014).



Figura 4 - Lagoa/Bacia de retenção
Fonte: Lourenço (2014)

- Trincheiras de percolação

As trincheiras de percolação/infiltração (Figura 5) são estruturas lineares construídas por meio de valas preenchidas com material granular, como brita ou cascalho e tem por objetivo a drenagem das águas pluviais (ALMEIDA *et. al.*, 2017). O material britado permite a reserva momentânea do escoamento, enquanto ocorre a infiltração da água no solo (CANHOLI, 2005). A geometria das trincheiras depende da capacidade de infiltração do solo e da área disponível para indução da infiltração. Suas estruturas podem ser projetadas apenas para infiltração da água pluvial, para armazenamento ou para ambas as funcionalidades (AGOSTINHO; POLETO; 2012). Embora funcional, essa técnica ainda é pouco difundida e empregada no Brasil devido às poucas informações encontradas a seu respeito (DARONCO; MINUZZI, 2018).

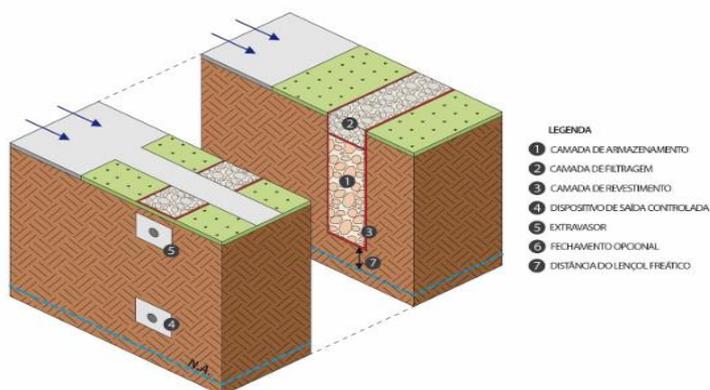


Figura 5 - Trincheira de infiltração
Fonte: Belo Horizonte (2022)

- Poços de infiltração

Os poços de infiltração (Figura 6) são dispositivos de retenção pontual em microescala que visam atenuar o escoamento superficial direto por meio da infiltração da água pluvial no solo (BARBASSA; SOBRINHA, MORUZZI; 2014). Esses dispositivos podem ser construídos com preenchimento de material granular (brita) formando um meio poroso revestido com tubos perfurados (concreto ou tijolos) envolto por manta geotêxtil (AGOSTINHO; POLETO, 2012).

Existem dois tipos de poços de percolação que se diferenciam pela posição de sua base em relação ao nível do lençol freático: os poços de injeção e os poços de infiltração. Os poços de infiltração estão sempre alocados acima do nível do lençol freático, pelo qual a água percola a camada não saturada do solo. Diferentemente para poços de indução, a base do poço está “inserida” na camada saturada, assim, o nível de água do solo está acima da base do poço (LOURENÇO, 2014).

Essas estruturas têm a vantagem de serem adotadas em locais com baixa permeabilidade na camada de solo, como por exemplo, áreas urbanizadas e pavimentadas, entretanto, demandam que as camadas do subsolo e camadas mais profundas tenham boa capacidade de infiltração (LOURENÇO, 2014). Além disso, devido a sua dimensão, essas estruturas não possuem capacidade de suporte de cargas elevadas de sedimentos e podem favorecer a infiltração de poluentes no solo.

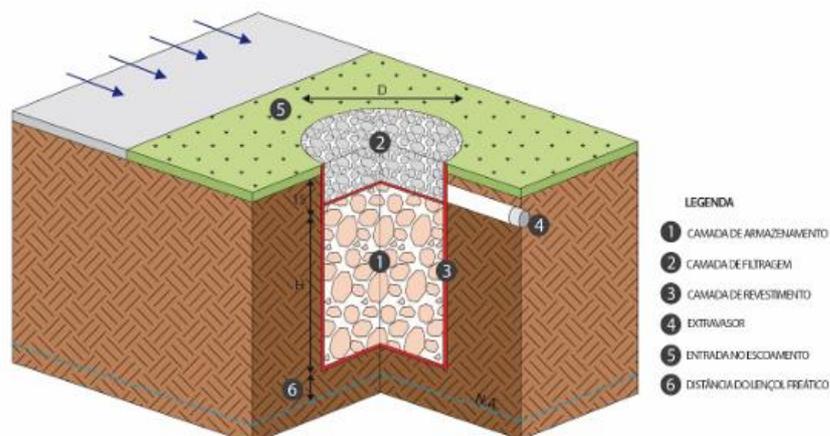


Figura 6 - Poço de infiltração
Fonte: Belo Horizonte (2022)

- Faixas gramadas

As faixas gramadas (Figura 7) são canteiros de infiltração que oferecem apoio à desaceleração dos escoamentos reduzindo assim os picos de vazão pluvial urbana. Comumente implantadas em residências, essas medidas costumam ser adotadas para atender a

obrigatoriedade mínima de área permeável nos lotes. Algumas das vantagens dessa técnica consiste na melhoria do aspecto visual, em função do paisagismo da área e a redução das ilhas de calor em centros urbanos, contudo requerem frequente manutenção para evitar os processos de colmatção (LOURENÇO, 2014).



Figura 7 - Faixa gramada
Fonte: Santos et. al.(2013)

- Pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis (Figura 8) são uma alternativa ao sistema de drenagem urbana convencional e distinguem-se dos pavimentos tradicionais por permitirem a infiltração no solo ou a drenagem da água pluvial pelas camadas drenantes, encaminhando posteriormente para outros componentes do sistema (LOURENÇO, 2014).

Essa solução é sugerida para ser adotada em arruamentos com baixa intensidade de tráfego como parques, estacionamentos, condomínios, praças, ciclovias, calçadões, quadras de esporte.

Como vantagem, essa técnica possui potencial para melhoria da qualidade da água do escoamento superficial, uma vez que permite a filtragem do líquido por seus materiais constituintes. Dessa forma, sua contribuição ocorre tanto na redução de alagamentos urbanos como redução da concentração de poluentes presentes no escoamento superficial (BECKER; PINHEIRO, 2019).



Figura 8 -Pavimento permeável

Fonte: Santos (2013)

- Jardins de Chuva

Os jardins de chuva (Figura 9) são estruturas construídas por depressões no solo que quando tratado (por compostos e insumos) retêm a água enquanto os micro-organismos e bactérias presentes removem poluentes difusos e as plantas removem nutrientes (MOURA, 2013). Sua estrutura deve ser construída por pelo menos três camadas responsáveis pela filtragem e retenção temporária da água. A camada superior composta pela vegetação é mantida pela camada do substrato (camada orgânica) que oferece meio físico para o desenvolvimento das plantas. Abaixo desta camada é mantida a camada de drenos, composta por areia e pedras. Para não comprometer sua eficiência, esse tipo de técnica não deve receber a contribuição de grandes áreas, sendo recomendado uma área máxima de 10.000 m².



Figura 9 - Jardim de chuva e biorretenção

Fonte: Moura (2013)

Já os canteiros pluviais (Figura 10) possuem estrutura e características semelhantes aos jardins de chuva, porém possuem menores dimensões facilitando a adoção em espaços limitados. São ideais para serem instalados em canteiros centrais, extensão de calçadas e espaços estreitos nas áreas urbanas (PEREIRA et. al., 2021).



Figura 10 - Canteiro pluvial

Fonte: Cortez et. al. (2019)

3.2.1.2. Técnicas de baixo impacto de armazenamento ou detenção

As técnicas de armazenamento são estruturas que permitem a reservação da água pluvial com posterior reutilização ou direcionamento da água ao sistema de micro ou macrodrenagem. Algumas técnicas de biorretenção (trincheiras e valas de infiltração) e os pavimentos permeáveis, permitem a detenção temporária da água por meio da captação através de drenos subsuperficiais. As técnicas projetadas especificamente para o armazenamento são descritas a seguir.

- Reservatórios a nível de lote

Os reservatórios a nível de lote (Figura 11) são microrreservatórios que possuem capacidade de retenção da água pluvial local. Também denominados por piscininhas ou cisternas, permitem a reservação de parcela da água pluvial podendo ser reaproveitada para diferentes usos (LOURENÇO, 2014). O uso em larga escala dos microrreservatórios pode contribuir significativamente para a redução do escoamento superficial e ser eficazes na atenuação da vazão de pico em eventos de precipitações extremas. Como desvantagem essa solução pode requerer grandes áreas para a reservação em função do volume a ser captado e inutiliza áreas para construção.

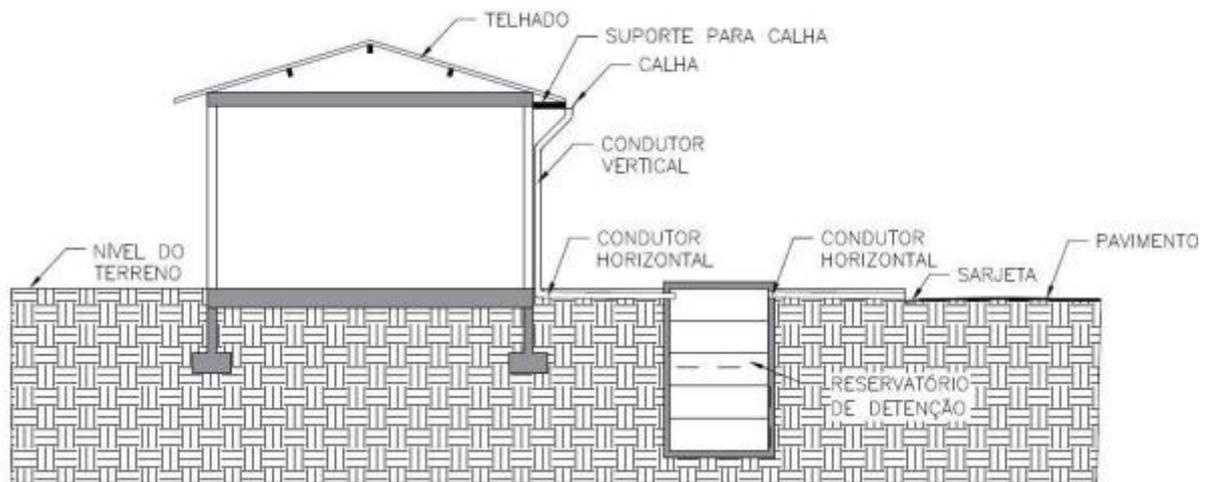


Figura 11 - Reservatório de lote

Fonte: Neto (2021)

- Telhado verde com captação

Também denominado por cobertura verde, telhado vivo ou jardim suspenso, o telhado verde (Figura 12) é uma composição sustentável de material vegetal plantada em solo tratado espalhado sobre um material (forro) antirraízes, sistema de drenagem (reservatórios e/ou drenos) e membrana impermeável disposta em uma edificação sobre a laje ou telhado convencional (NETO *et. al.*, 2021, RIBEIRO; NUNES, 2020).

Quanto ao aspecto construtivo Agostinho e Poletto (2012) apontam que há duas medidas de implementação, sendo estes o modo intensivo e extensivo, os quais estão relacionados ao tipo de vegetação adotada na composição da estrutura. Os telhados verdes intensivos são telhados compostos por camadas de solo espessas que permitem a acomodação de plantas de porte maior com raízes mais profundas (árvores ou arbustos), já os telhados extensivos, são compostos por vegetação de natureza rasteira como gramados.

Além de adicionar benefícios estéticos à paisagem e a edificação, essa solução é uma alternativa aliada na redução do escoamento superficial; proporciona melhora na qualidade do ar e da água; reduz os efeitos térmicos das ilhas de calor; são ótimos isolantes acústicos e, contribuem para a economia de energia (NETO *et. al.*, 2021).

Os autores Neto *et. al.* (2021) ressaltam que essa solução tem contribuições essenciais ao gerenciamento dos sistemas alternativos em áreas urbanas densas, uma vez que ocupam espaços que não seriam utilizados para outros fins.

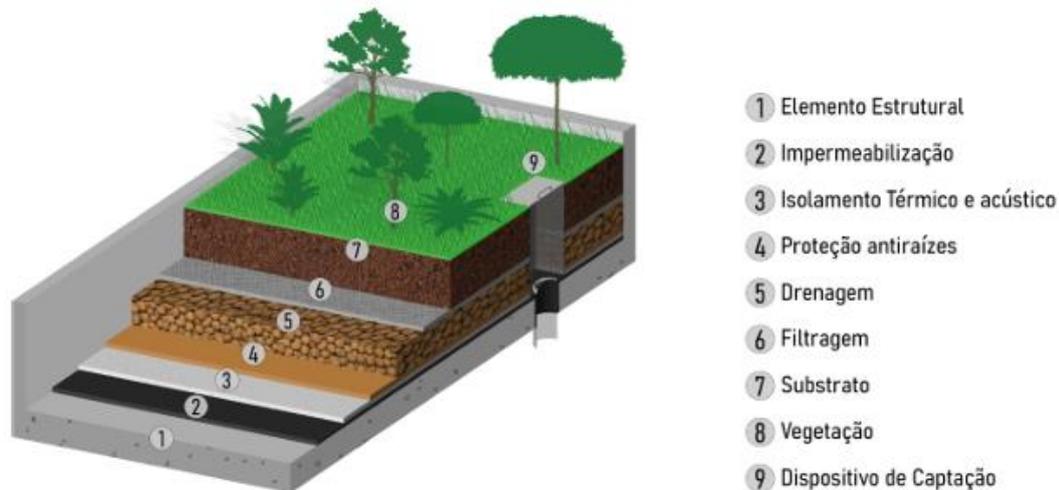


Figura 12 - Telhado verde
 Fonte: Belo Horizonte (2022)

- Bacias de retenção

As bacias de retenção, também conhecidas como piscinões, são estruturas projetadas para controlar o escoamento superficial e atenuar os problemas de inundação a jusante, por meio do armazenamento da água em depressões. Essas estruturas apresentam restrições na saída de água que permitem diminuir a vazão de jusante, restaurando as condições da bacia no processo de pré-urbanização (RODRIGUEZ; TEIXEIRA, 2021).

Os reservatórios de retenção não reduzem o volume de escoamento, na verdade, realizam a redistribuição das vazões ao longo do tempo. Seu sistema conta com drenos para escoamento total com duração inferior ao tempo de um dia (ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017) a fim de oferecer uma solução para os problemas de inundação localizadas.

Entre as vantagens dessa alternativa, está o controle das altas vazões, a redução da erosão nas margens dos corpos hídricos, a redução dos custos por demais infraestruturas de drenagem (redução das dimensões das galerias) e a retenção de poluentes (RODRIGUEZ; TEIXEIRA, 2021). Em relação a esta última característica, Silva, Neto e Ingunza (2019) apontam que com a decantação de poluentes provenientes do escoamento superficial e da contaminação atmosférica, a reserva de água pluvial em reservatórios pode ser útil para empregos produtivos da água reservada. Dependendo das propriedades da água pluvial armazenada nas lagoas de retenção, podem ser necessários dispositivos para melhorar a qualidade da água e oferecer um tratamento a diferentes níveis (primários, secundários ou terciários) para então fornecer posterior uso da água retida (SILVA; NETO; INGUNZA, 2019).

Em contrapartida, a solução por detenção demanda grandes áreas que dependendo do uso da bacia poderá envolver custos com desapropriação. Além disso, soma-se os custos com a infraestrutura, que pelo porte da obra demandará maiores recursos para implementação e a necessidade de manutenção rotineira, pouco adotada nas obras públicas de reservação de detenção.

Dentre as vantagens da aplicação das técnicas de baixo impacto, a redução do escoamento superficial é o fator primordial para a mitigar as consequências dos alagamentos. No entanto, cada uma das medidas possui limitações dentre as quais devem ser minuciosamente avaliadas durante a escolha da solução para a implementação. No Quadro 3 estão sintetizadas as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas de baixo impacto, bem como a aplicabilidade e as restrições de implantação.

Quadro 3 – Aplicação e restrições de aplicação das técnicas de baixo impacto

Dispositivo	Aplicação	Não é aconselhável	Vantagens	Desvantagens
Pavimento permeável	Áreas industriais, pátios, galpões, estacionamentos, condomínios, conjuntos habitacionais, praças, calçadas, calçadões, quadras esportivas, áreas com baixo tráfego	<ul style="list-style-type: none"> - Presença de solos colapsíveis - Presença de infraestrutura de abastecimento de água (rede de água) - Para pavimentos porosos, zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita a infiltração da água e ganhos ambientais para a recarga de aquíferos - Possibilidade de captação por drenos - Conforto e segurança nos arruamentos em função da redução dos riscos de aquaplanagem e melhor visibilidade da sinalização de trânsito horizontal - Maior capacidade de infiltração - Redução de custos em função da redução das dimensões pela infraestrutura de drenagem urbana - Sem exigência de espaço adicional, abrange áreas similar à pavimentação tradicional - Controle de erosão do solo - Potencial de melhora da qualidade da água do escoamento superficial 	<ul style="list-style-type: none"> - Restrição de áreas para a implantação - Sujeito à colmatação - No caso de pavimentos de infiltração, há o risco de contaminação do lençol freático - Necessidade de manutenção frequente - Poucos profissionais com conhecimento técnico para implementação - Custo superior ao sistema de pavimentação tradicional - Risco de falha caso seja mal executado e apresente pouca ou nenhuma manutenção
Microreservatório (reservatórios de lote, cisternas, piscininhas)	<ul style="list-style-type: none"> - Unidades habitacionais - Residências - Prédios públicos - Unidades a nível de lote em geral 	<ul style="list-style-type: none"> - Locais desprovidos de espaço para implantação de medidas que demandam maiores áreas 	<ul style="list-style-type: none"> - Não transfere para a jusante os impactos da urbanização 	<ul style="list-style-type: none"> - Os critérios de projeto ainda são muito simplificados - Requer espaço, se não for enterrado pode inutilizar área para construção - Dificuldade na manutenção - Possibilitam pouca redução de poluentes

Continua...

Quadro 2 - Aplicação e restrições de aplicação das técnicas de baixo impacto (continuação)

Dispositivo	Aplicação	Não é aconselhável	Vantagens	Desvantagens
Trincheira de infiltração	Lotes residenciais, pátios, praças, jardins, parques de estacionamento, áreas residenciais, áreas comerciais e industriais	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas sujeitas a deslizamento - Áreas com elevada inclinação - Terrenos pantanosos - Áreas sujeitas a efeitos de maré 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução do escoamento superficial - Redução de alagamentos e lâminas d'água - Possibilita a infiltração da água e ganhos ambientais para a recarga de aquíferos - Baixo/médio custo de implantação - Possibilidade da redução do tamanho das estruturas de drenagem de água pluvial a jusante -Boa integração no meio ambiente - Facilidade na implantação - Baixa ou pouca interferência na paisagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Sujeito à colmatção - Possibilidade de contaminação dos aquíferos - Manutenção frequente necessária - Custo ligeiramente mais elevado que um sistema convencional (LOURENÇO, 2014) - Dificuldade em definir o tempo de vida útil, principalmente relacionados aos efeitos de colmatção
Vala de infiltração	- Espaços abertos, ruas, canteiros de rodovias	<ul style="list-style-type: none"> - Lençol freático elevado - Zonas de captação de água para consumo 	<ul style="list-style-type: none"> -Contribui com a paisagem vegetal -Recarga dos aquíferos subterrâneos -Pode ser usado em espaços de lazer -Purificação da água por decantação -Redução de alagamentos 	<ul style="list-style-type: none"> -Sujeito à colmatção -Manutenção frequente -Risco de poluição do lençol freático -Risco de estagnação da água nessas estruturas
Telhado reservatório	-Edifícios residenciais, edifícios de serviços, edifícios industriais ou comerciais, coberturas de parques de estacionamento subterrâneos.	<ul style="list-style-type: none"> - Instalações sem estrutura para receber a composição do telhado reservatório 	<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento acústico e redução do ruído nas edificações - Eficiência energética e redução dos custos com energia - Redução de vazão à jusante - Não necessitam de grandes investimentos - Não há diferenças técnicas na construção comparado aos telhados convencionais 	<ul style="list-style-type: none"> - Para telhados intensivos os custos com manutenção são elevados - Manutenção regular - Dificuldade de ser executado em telhados de elevada declividade - Aumento de carga à estrutura das edificações

Continua...

Quadro 2 - Aplicação e restrições de aplicação das técnicas de baixo impacto (continuação)

Dispositivo	Aplicação	Não é aconselhável	Vantagens	Desvantagens
Poço de infiltração	<ul style="list-style-type: none"> -Solos com boa capacidade de infiltração -Solos arenosos a siltosos 	<ul style="list-style-type: none"> - Terrenos com instabilidade - Zonas de solos colapsíveis - Presença do lençol freático com distância inferior a 1 metro da base do poço - Zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático - Zonas com captação de água usada para fins nobres - Solos com baixa permeabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de construção e manutenção - Facilidade na implantação - Compatibilidade com solos que apresentem uma camada pouco espessa de solo impermeável ou pouco permeável - Baixa interferência na paisagem - Ocupa pouco espaço longitudinal e possibilita atingir altas profundidades - Flexibilidade nas áreas de aplicação - Permite a associação de demais técnicas de controle na fonte - Se o escoamento possui qualidade que não implique na contaminação das águas subterrâneas, pode promover a recarga dos aquíferos 	<ul style="list-style-type: none"> -Precisa de pré-tratamento -Possui escala reduzida dos efeitos de armazenamento -Manutenção frequente necessária -Sujeito à colmatação -Não compatível com terreno rochoso -Não compatível com presença de lençol freático elevado -Risco de contaminação do solo
Telhados verdes	<ul style="list-style-type: none"> - Edifícios residenciais, de serviços, industriais ou comerciais -Coberturas de parques de estacionamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalações sem estrutura para receber a composição do telhado reservatório 	<ul style="list-style-type: none"> - Oferece utilização para espaços antes inutilizáveis - Contribuição para a paisagem - Aumento da fotossíntese que implica na maior produção de oxigênio e reciclagem de dióxido de carbono -Regulação da temperatura urbana -Melhora da qualidade do ar - Redução do efeito estufa 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausência de mão de obras especializada no mercado - Ausência de normas técnicas e orientativas - Incertezas sobre custos e benefícios Acréscimo de carga para o edifício -Falta de incentivos à implementação -Custo de manutenção elevado para coberturas intensivas (plantas com raízes mais profundas)

Continua...

Quadro 2 - Aplicação e restrições de aplicação das técnicas de baixo impacto (continuação)

Dispositivo	Aplicação	Não é aconselhável	Vantagens	Desvantagens
Reservatório de detenção aberto (Bacias de detenção);	-Áreas públicas, como praças, parques, quadras, que tenham outra destinação após as precipitações	- Presença de solos colapsíveis -Solos com baixa resistência	- Redução dos efeitos de inundações	- Dificuldade na manutenção - Após eventos de chuva, há o acúmulo de resíduos sólidos e sedimentos carreados pelo escoamento superficial da bacia
Reservatório de retenção aberto (Bacias de retenção/lagoas de infiltração)	- Áreas com espaço disponível - Pela capacidade de armazenamento, se tratada a água pode ser aplicada para diversos fins, assim o reservatório também é indicado a locais com baixa pluviosidade para atender as demandas por água em períodos de seca	-Solos com baixa resistência - Presença de solos colapsíveis	- Controle de erosão - Melhoria do comportamento do sistema de drenagem - Redução da carga poluente presente no escoamento -Criação de pontos de interesse recreativo -Recarga dos aquíferos -Criação de reservas agrícolas, combate a incêndios, reuso da água	-Necessidade de ocupação de grandes áreas -Risco de proliferação de insetos e doenças - Risco de segurança em situações de margens desprotegidas - Possibilidade de impactos negativos no ambiente urbano
Faixa gramada, biovaletas, jardins de chuva, canteiros pluviais	- Áreas relativamente pequenas como: calçadas, coberturas, parques de estacionamento, vias urbanas locais próximas ao meio fio, nas calçadas/passeios	-Áreas com lençol freático elevado - Zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático -Grandes áreas de contribuição. Sua aplicação está limitada a 10.000m ² - Solos com baixa permeabilidade	- Controle de erosão - Melhoria do comportamento do sistema de drenagem - Baixo custo de construção e manutenção - Baixa interferência na paisagem	-Sujeito à colmatação -Manutenção e limpeza frequente -Risco de poluição do lençol freático

Fonte: Adaptado de Brito (2006); Lourenço (2014); Viana e Moraes (2020)

3.2.2. Medidas estruturantes

Dentre as medidas estruturantes (não estruturais) para manter a operação do sistema de drenagem em condições adequadas de funcionamento, Lemos (2021) destacam-se as seguintes medidas:

- A realização de limpeza frequente das bocas de lobo, galerias, bueiros, canais abertos e fechados e sarjetas: a programação da limpeza dos dispositivos e estruturas de drenagem visa manter as estruturas nas condições de seção livre para a condução da água pluvial sem a interferência ou obstrução das unidades que afetem seu funcionamento. O Manual de Drenagem Urbana e Manejo de Águas Pluviais de São Paulo (2012) orienta que a frequência de limpeza dessas estruturas deve ser diária para as sarjetas e não superior a 60 (sessenta) dias para demais estruturas, sendo necessário ser priorizadas durante os períodos chuvosos;
- A realização de inspeções rotineiras para averiguação das condições estruturais do sistema de drenagem: as manutenções devem buscar reparar os danos identificados nas estruturas. Para isso, Lemos (2021) realça a importância do cadastro da rede existente contendo as especificações do material, diâmetro e tipo de dispositivo de microdrenagem, a fim de agilizar e facilitar a programação das inspeções de rotina, além das manutenções a serem realizadas;
- A fiscalização para identificação de ligações clandestinas na rede: as ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial são responsáveis pela contaminação do meio ambiente, uma vez que a água pluvial é conduzida para os corpos hídricos. Além disso, o volume de esgoto lançado na rede pluvial pode impactar a capacidade de escoamento projetada da rede comprometendo sua operação;
- A promoção de ações para a conscientização ambiental da população: as ações ambientais buscam a sensibilização da população a respeito de sua responsabilidade quanto os impactos de suas ações sobre o meio ambiente. Não há como pensar em ações de educação ambiental sem considerar o comprometimento e a responsabilidade individual de cada cidadão.
- A elaboração de instrumentos de planejamento do sistema de drenagem urbana: os instrumentos de planejamento do setor urbano como o Plano

Diretor de Drenagem Urbana e Plano de Saneamento Básico são importantes ferramentas que auxiliam os municípios a se planejarem quanto às ações necessárias para sanar as condições deficitárias da drenagem urbana. É por meio desses instrumentos que o município terá diretrizes norteadoras ao desenvolvimento do setor através da delimitação de medidas que devem ser implantadas por meio de programas, projetos e ações promovedoras do desenvolvimento da drenagem pluvial e

- O acompanhamento e monitoramento do sistema de drenagem: ao longo da execução do planejamento estruturado é importante que o município mantenha o compromisso de monitorar constantemente o setor da drenagem urbana que se vale da aplicação de indicadores definidos nos instrumentos de planejamento, os quais permitem obter uma sensibilidade temporal indicando as tendências e mudanças ocorridas ao longo dos anos, facilitando a análise da eficácia do sistema de gestão adotado e a identificação da necessidade de intervenções nos pontos críticos do sistema;

3.3. Modelo SWMM

O modelo *Storm Management Model* (SWMM) é um sistema de modelagem dinâmica chuva-vazão, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA), capaz de simular o escoamento superficial de eventos chuvosos em um conjunto de bacias hidrográficas (USEPA, 2015). O SWMM foi desenvolvido em 1971 e tem vasta aplicação tanto em estudos de águas residuárias como de águas pluviais. Segundo manual do SWMM, as aplicações do modelo podem ser divididas em:

- Estudos, modelagem e dimensionamento dos sistemas de drenagem (rede, estruturas de retenção e acessórios) para controle de inundações;
- Avaliação da eficácia das estruturas de infiltração na redução do índice de poluentes carregados durante a chuva;
- Identificação e delimitação de zonas de inundação nos leitos naturais;
- Avaliação de medidas para reduzir o transbordamento dos sistemas de coleta unitários e mistos;
- Oferece embasamento para estudos de lançamento de efluentes a partir da poluição difusa gerada no sistema;

3.3.1. Funcionamento do módulo LID

O funcionamento do módulo LID no SWMM é similar a uma estrutura composta por reservatórios com armazenamento em camadas verticais estratificadas nas estruturas LID (Figura 13). Por meio dessa configuração, o modelo SWMM é capaz de simular os eventos e processos do balanço hídrico que se inicia pela precipitação, infiltração (camada de solo), escoamento (camada superficial) e/ou evapotranspiração, seguida da percolação nas camadas de armazenamento das estruturas.



Figura 13 - Representação conceitual de uma bacia de infiltração
Fonte: Adaptado de Rossman (2010)

Cada uma dessas camadas se caracterizam por seu papel na estruturação de uma LID (Rossman, 2010):

- A camada superficial representa o terreno natural ou a pavimentação que servirá de área de contribuição para a precipitação e o escoamento das áreas a montante. Quando há a existência de depressões, favorece o armazenamento e gera o escoamento que alimenta o sistema de drenagem e atinge as áreas a jusante.
- A camada pavimento é a camada de sustentação para a camada superficial constituída por concreto ou asfalto poroso (sistemas de pavimentação porosa) ou blocos de pavimentação e material de preenchimento (sistemas modulares).
- A camada de solo é o substrato que sustentará o crescimento vegetal das estruturas LID.
- A camada de armazenamento é a unidade capaz de reter a água até seu total esvaziamento. Nas cisternas, compõem a própria estrutura de contenção. Nas

bacias de filtração, pavimentos permeáveis e trincheiras, correspondem ao leito de matéria granular.

- O dreno profundo é a camada responsável por conduzir a água que provém das camadas superiores para um conduto ou caixa de contenção.

3.3.2. Técnicas LID presentes no modelo

Atualmente a versão americana 5.2 do SWWM permite a simulação de oito técnicas LID: células de biorretenção (*Bio-retention Cells*), Coberturas verdes (*Green roofs*), jardins de chuva (*Rain Gardens*), Pavimentos permeáveis (*Permeable Pavement*), Trincheira de infiltração (*Infiltration Trench*), cisternas (*Rain Barrel*), valas vegetadas (*Vegetative swale*) e lançamento direto em permeáveis (*Rooftop Disconnection*).

3.3.3. Parâmetros das técnicas LID

Os parâmetros LID necessários ao modelo são requisitados por meio das camadas das estruturas. No Quadro 4 estão apresentados os parâmetros exigidos pelo modelo e algumas sugestões de valores a serem adotadas segundo a norma ABNT NBR 16.416/2015 - Pavimentos permeáveis de concreto, as recomendações dos manuais do SWMM de Gironás (2010), Rossman (2010), USEPA (2010) e o Manual de Drenagem da ADASA (2018).

Além das recomendações indicadas no Quadro 4, salienta-se que acerca das disposições construtivas, o Manual de Drenagem da ADASA (2018) orienta a implantação de pavimentos com infiltração total ou parcial, a uma distância (vertical) mínima de lençóis freáticos correspondente a 1,0m abaixo do subleito. Sendo necessário também, manter a distância (horizontal) mínima de 30 m de qualquer fonte de captação subterrânea (ABNT NBR 16.461/15).

Quanto aos efeitos de redução da eficiência das técnicas LID ao longo do tempo de uso, o modelo prevê a inserção do parâmetro de colmatação prevendo a redução da eficiência durante o processo de deposição de sedimentos e o entupimento dos poros. Com a sedimentação, a permeabilidade do pavimento decai podendo tornar-se nula, somente sendo reversível se adotados procedimentos adequados de manutenção (ADASA, 2018). Para isso, o modelo exige o índice de colmatação que pode ser estimado a partir da adoção de um período estipulado que represente a durabilidade da unidade até que todo o sistema seja colmatado, por meio da equação 1:

$$F_c = \frac{Y_{clog} \cdot P_a \cdot CR \cdot (1 + ISF)}{T \cdot VR} \quad (1)$$

Em que:

F_c : Fator de colmatação [adim]

Y_{clog} : Quantidade de anos para colmatar a estrutura [anos]

P_a : Quantidade de chuva anual sobre o local [mm/ano]

CR : Taxa de captação do pavimento (área que contribui com o escoamento para o pavimento dividido pela área do pavimento permeável)[%]

VR : índice de vazios do sistema [%]

ISF : fração de superfície impermeável [%]

T : espessura da camada do pavimento [cm]

De acordo com Rossman (2010), o índice de vazios típico para pavimentos varia de 0,12 a 0,21, contudo na realidade brasileira, a norma ABNT NBR 14.416/15 recomenda valores superiores a 0,32 conferindo maior porosidade ao pavimento.

A camada de drenos é uma camada opcional, o parâmetro necessário a sua implementação é dado pela densidade de fluxo (coeficiente de descarga -q) através do dreno profundo em função da altura da água armazenada(h) acima da altura da drenagem (H_d), obtido pela equação (Rossman, 2010):

$$q = C(h - H_d)^n \quad (2)$$

Em que:

q:descarga [mm/h]

C: coeficiente de drenagem [adim]

h:altura da água armazenada [mm]

H_d : altura da drenagem [mm]

n: expoente de drenagem. Valor típico = 0,5 para que o dreno tenha funcionamento semelhante a um orifício

Sendo o coeficiente de drenagem dado pela expressão:

$$C = \frac{2 \cdot D^{0,5}}{T} \quad (3)$$

Em que:

T: altura do dreno acima do fundo da camada de armazenamento da estrutura [mm] e D: profundidade de água armazenada [mm].

Quadro 4 - Parâmetros essenciais para as técnicas LID

Camada	Parâmetro	Descrição	Valores recomendados	Fonte
Superfície	Altura da berma (mm)	Profundidade de armazenamento na superfície	Tabela 10 - Profundidade de armazenamento em depressão	ASCE (1992 apud USEPA, 2012)
	Fração da cobertura vegetal (%)	Fração da camada com presença de vegetação	Pode ser ignorado. Porém, para crescimento vegetal muito denso considerar valores de 0,1 a 0,2	Gironás et. al. (2009)
	Coefficiente de Manning	Fator de rugosidade	Pavimentos permeáveis de <u>concreto</u> : 0,012 Pavimentos permeáveis de <u>asfalto liso</u> : 0,011 <u>Valas vegetadas</u> : 0,15	USEPA (2015)
	Declividade da superfície (%)	Declividade da camada	Para medidas de infiltração: Declividade máxima = 5%	ADASA (2018)
Pavimento	Espessura (mm)	Profundidade da camada do pavimento	60 a 80 mm para tráfego leve em peças de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas).	ABNT 16.416/15
	Índice de vazios	Relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos	Índice de vazios > 0,35	ABNT 16.416/15
	Fração da superfície impermeável (%)	Relação do pavimento impermeável sobre a área total no caso de sistemas modulares	Para sistemas contínuos permeáveis considerar valor nulo	Rossmann (2010)
	Permeabilidade (mm/h)	Taxa de permeabilidade da camada	Independente do tipo de pavimento deve apresentar coef. permeabilidade superior a 10^{-3} m/s (3600 mm/h)	ABNT 16.416/15
	Fator de colmatação	Taxa de entupimento dos espaços vazios da camada	Para ignorar o efeito de colmatação empregar o valor 0. O índice pode ser calculado pela equação descrita no item 3.3.3	Rossmann (2010)

Quadro 3- Parâmetros essenciais para as técnicas LID (continuação)

Camada	Parâmetro	Descrição	Valores recomendados	Fonte
Solo	Espessura (mm)	Espessura da camada	Telhados verdes: 75 a 150 mm; Jardins, jardim de chuva e outras medidas de filtração: 450 - 900 mm	Rossman (2010)
	Porosidade	Relação entre o volume de poros e o volume total do solo	Areia (0,437), Argila(0,475) e Silte (0,463)	Rossman (2010)
	Capacidade de campo	Capacidade máxima de retenção da água antes de iniciar a drenagem para as camadas inferiores	Areia (0,062), Argila(0,378) e Silte (0,232)	Rossman (2010)
	Ponto de murcha	Mínimo teor de umidade do solo para manter a vegetação	Areia (0,024), Argila(0,265) e Silte (0,116)	Rossman (2010)
	Condutividade hidráulica (mm/h)	Condutividade hidráulica do solo saturado	Areia (120,4), Argila(0,254) e Silte (3,302)	Rossman (2010)
	Declividade de condutividade	Inclinação média da curva do log da condutividade versus o teor de umidade do solo (adimensional)	Os valores típicos variam de 5 para areia a 15 para a argila siltosa.	Rossman (2010)
	Potencial matricial (mm)	Valor médio do potencial matricial do solo na frente de umedecimento (mm). Este é o mesmo parâmetro utilizado no modelo de infiltração Green-Ampt	Areia (49,02), Argila(320,04) e Silte (88,9)	Rossman (2010)

3.3.4. Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo é necessária para estimar parâmetros que retratem melhor o comportamento dos processos na bacia e minimizem as diferenças entre as observações de campo e as previsões do modelo computacional.

As dificuldades encontradas para executar um processo de calibração está em ajustar os parâmetros para representar a complexa configuração do sistema (FORMIGA et.al, 2016). Esse processo envolve tanto a definição das características morfológicas da bacia quanto a relação entre o processo de precipitação e escoamento, que implica no grande número de parâmetros locais (dados de vazão, perfis de calha, batimetria, entre outros), exigidos pelo SWMM, que por vezes não estão disponíveis (BEHROUZ et.al., 2020).

A ausência de dados monitorados é uma das principais barreiras que dificultam a calibração e validação dos modelos visto que não há dados mensurados para serem comparados aos dados simulados pelo modelo. É nessa ótica que o apoio da população local pode auxiliar na compreensão e caracterização dos eventos que servirão a posterior calibração e validação dos modelos. Esse recurso é conhecido como ciência cidadã e insere a população aos processos de pesquisa em que o público não-cientista gera um conhecimento científico novo, atuando na coleta de dados como “sensores humanos” (Buytaert et. al, 2014 *apud* Fava et. al, 2018).

Por meio da ciência cidadã a população atua em diferentes frentes, desde o levantamento e registros em vídeos/imagens, monitoramento em réguas de nível dos rios, leitura de pluviômetros, entre outros. Desse modo, a simples leitura monitorada do nível de um rio por exemplo, poderá servir de parâmetro para comparar a lâmina de água de um evento atingida em determinada seção para avaliar se os níveis de lâmina d’água simulados pouco se destoam dos níveis observados e garantem uma simulação compatível com o esperado em campo.

Assumpção et. al. (2018) exemplifica quatro níveis de colaboração participativa da população nos processos de aquisição de dados, sendo o primeiro nível aquele cujos participantes atuam apenas na coleta de dados; no segundo nível os participantes são requisitados para atuar na interpretação dos dados; no terceiro nível, participam da definição do problema e no quarto nível, os participantes estão envolvidos em todo o processo de delimitação e interpretação do problema no processo científico.

Neste estudo, será adotado o recurso de ciência cidadã a partir dos registros fotográficos dos eventos chuvosos no local de estudo e dos relatos da população apontados no recente diagnóstico do plano de saneamento do município, elaborado no ano de 2020. Neste caso, como a população não teve intuito de gerar informações com a proposta específica para prover estimativas ao estudo, Assumpção et. al. (2018) a classifica como voluntariado implícito.

3.4. Distribuições estatísticas para determinação de precipitações máximas

Para determinar as precipitações máximas necessária para a chuva de projeto, pode-se recorrer às distribuições empíricas. A distribuição de Gumbel, também conhecida por distribuição Extremo Tipo I, tem vasta aplicação para retratar acontecimentos máximos identificados como por exemplo, na distribuição dos caudais ou a distribuição das precipitações máximas anuais (GUIMARÃES, 2011). Essa distribuição é mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com aplicações na determinação de relações intensidade-duração-frequência de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A função de quantis de Gumbel é expressa pela equação 4:

$$x(T) = \beta - \alpha \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

Em que:

$x(T)$: precipitação [mm]

α : parâmetro de escala dado por $\frac{\sigma_x}{1,283}$ (σ_x = desvio padrão amostral)

β : parâmetro de posição dado por $\bar{X} - 0,45 \sigma_x$ (\bar{X} =média amostral; σ_x = desvio padrão amostral)

T: tempo de retorno [anos]

A distribuição Log-normal é uma generalização da distribuição normal que possui boa aderência a variáveis hidrológicas (GUIMARÃES, 2011). A função de quantis da distribuição Log-normal é dada por:

$$x(T) = \exp\left(\bar{X}_{\ln x} + k_T * \sigma_{\ln x}\right) \quad (5)$$

Em que:

$x(T)$: precipitação [mm]

$\bar{X}_{\ln x}$: média dos logaritmos neperianos da amostra [mm]

x : precipitação [mm]

$\sigma_{\ln x}$: desvio padrão amostral dos logaritmos neperianos da amostra [mm]

K_T : fator de frequência, igual à variável normal central reduzida Z da distribuição normal dada por:

$$Z \approx - \left(W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right), \text{ com } W = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{P(X \leq x)} \right)} \rightarrow \text{Se } 0 \leq P(X \leq x) \leq 0,5$$

$$Z \approx \left(W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right), \text{ com } W = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - P(X \leq x))^2} \right)} \rightarrow \text{Se } 0 \leq P(X \leq x) \leq 0,5 \quad (6)$$

E os parâmetros $C_0 = 2,515517$; $C_1 = 0,802853$; $C_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$ e $d_3 = 0,001308$.

A distribuição Log-Pearson Tipo III é comumente empregada na descrição das frequências dos caudais de cheia (GUIMARÃES, 2011). Segundo King (1977) *apud* Naghettini e Pinto (2007), a função de quantis para a distribuição Log-Pearson Tipo III é dada por:

$$x(T) = \bar{X}_{\ln x} + K_T * \sigma_{\log x} \quad (7)$$

Em que:

$x(T)$: é a estimativa do quantil associado ao tempo de retorno T [mm]

$\bar{X}_{\ln x}$: média dos logaritmos neperianos da amostra [mm]

$\sigma_{\log x}$: desvio padrão dos logaritmos da amostra [mm]

K_T : fator de frequência, o qual pode ser estimado pela expressão:

$$K_T \approx Z + (Z^2 - 1) \frac{\gamma}{6} + \frac{1}{3} (Z^3 - 6Z) \left(\frac{\gamma}{6} \right)^2 - (Z^2 - 1) \left(\frac{\gamma}{6} \right)^3 + Z \cdot \left(\frac{\gamma}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma}{6} \right)^5 \quad (8)$$

Com Z expresso pela normal central reduzida Z da distribuição normal (Equação 6) e o coeficiente de assimetria inferior a 2 ($\gamma < 2$) dado por:

$$\gamma = \frac{n \sum_1^n (\ln x - \bar{y})^3}{(n-2) [\sum_1^n (\ln x - \bar{y})^2]^{3/2}} \quad (9)$$

Em que n é o tamanho da amostra e \bar{y} é a média do logaritmo neperiano de x .

3.5. Estudos anteriores

Apenas simular o sistema de drenagem e apontar os riscos de alagamentos não é suficiente para garantir que as medidas pluviais sustentáveis reflitam o efeito positivo sobre o sistema de drenagem, é necessário portanto, adicionar a essas estratégias medidas de mitigação de risco e impactos (DINIZ, 2022). Seguindo essas medidas e o novo escopo de gestão da drenagem urbana (gestão integrada a modelagens computacionais), vários estudos têm, por meio da modelagem computacional e em diferentes escalas de estudo, investigado o potencial das técnicas de baixo impacto na redução dos escoamentos superficiais e da vazão de pico (Tabela 1).

A exemplo disso, os autores Yin et. al. (2020) aplicaram o modelo SWMM integrado ao modelo 2D Cellular Automata Dual Drainage Simulation (CADDIES) para analisar o efeito da implementação dessas medidas na comunidade Zhuhai (China). Os resultados apontaram que com a idealização de cidades-esponja, haveria uma redução máxima de 94,4% do escoamento superficial para eventos de precipitação de baixo e médio impacto. Contudo, sob condições extremas de chuva, a modelagem indicou baixa taxa de redução de escoamento, apenas 28% do escoamento anual era reduzido.

Resultado semelhante foi verificado por Fava et. al. (2022) que também relatou a mesma problemática ao apontar que as intervenções LID mitigaram o risco de inundação na cidade de São Carlos – SP, porém com notável sucesso para eventos menos críticos de chuva. Ao analisar que a prática LID teve sucesso na redução de 30% a 40% dos fluxos de pico em cenários de tempestades fracas e moderadas, e insucesso na atenuação dos fluxos de pico quando se inclui as variações climáticas, (chegando a reduzir apenas 10% do valor), associou este resultado ao aumento do volume pluviométrico e manutenção da capacidade máxima de biorretenção.

Dessa forma entende-se que é crucial a análise da variável de mudanças climáticas em cenários futuros, a fim de que essas soluções não sejam subdimensionadas e para o bom desempenho das técnicas de baixo impacto. Assim, é importante manter a atualização constante das curvas Intensidade-Duração- Frequência (IDF) para prever situações mais severas advindas das mudanças climáticas e reduzir o risco de falhas nas obras hidráulicas (VERGUTZ, PEREIRA e SCHMIDT, 2019).

A modelagem integrada dos sistemas de drenagem também é uma importante ferramenta para auxiliar a gestão da drenagem e a avaliação dos parâmetros de permeabilidade

exigidos nos dispositivos legais. Os autores Zanandrea e Silveira (2019) mostraram que a modelagem integrada dos sistemas de drenagem tem aptidão para a avaliação dos parâmetros da legislação local ao analisar, por meio da simulação computacional a ineficiência hidrológica das taxas de permeabilidade exigidas no Plano Diretor do município de Viamão, o que culminou em indicar novos parâmetros para a permeabilidade do município.

Em vista desta praticidade, as simulações elaboradas nos modelos oferecem parâmetros de alerta aos gestores com relação aos cenários de perigo e risco como indicou o estudo de Hasan et. al. (2019) ao alertar que até mesmo com os registros de chuvas com tempos de retorno menores, haveria a ocorrência de inundações na bacia do rio Aur na Malásia caso não fossem tomadas soluções de mitigação de impactos. Este tipo de análise torna-se importante, pois além de identificar áreas ou regiões prioritárias para receberem melhorias, podem oferecer decisões gerenciais mais adequadas (TAVARES et. al., 2021).

A dinamicidade dos modelos ainda possibilita a integração e simulação de várias técnicas permitindo a avaliação da melhor alternativa a ser implementada no sistema de drenagem. Essa integração ainda permite analisar a eficiência das técnicas de baixo impacto como em Lappicy, Costa e Koide (2020) que concluiu a inviabilização do uso de lagoas de retenção no Distrito Federal, ou a análise da eficiência de trincheiras de infiltração (Song, Chum e Kim, 2018), telhados verdes (Pedrosa et al., 2021; Paithankar, Taji, 2020), pavimentos permeáveis (Zhu et. al., 2019), poços e valas de infiltração (Mendes e Santos, 2021) e demais medidas (Tabela 1).

Corroborando para estes exemplos, Bai et. al. (2019) compararam a eficiência entre instalações de infiltração com instalações de armazenamento demonstrando que o modelo combinado (infiltração + armazenamento) tem mais sucesso na redução da vazão de pico do que na redução do volume de inundação, e que as instalações de infiltração têm a maior taxa de redução do escoamento superficial em comparação com as instalações de armazenamento.

Essas alternativas de comparação corroboram para o apoio à tomada de decisão e permitem que os gestores tenham ações mais seguras na escolha das tecnologias para resolução dos problemas de infraestrutura urbana. Assim, tornam-se importantes ferramentas que podem ser colocadas em prática em vários domínios para auxiliar os tomadores de decisão em relação às práticas de LIDs para obter o máximo de benefícios ambientais e minimizar os custos de infraestrutura (KUMAR et. al., 2022).

Tabela 1- Estudos de avaliação das técnicas LID baseados em modelagem computacional

Referência	Escala	Área de estudo	Modelo	Técnica LID	Redução de escoamento	Redução da vazão de pico
Peng et. al.(2018)	Sub-bacia	Distrito Yangxia, China	PCSWMM	Cidades-esponja	9,75% a 36,46%	-
Vergutz, Pereira e Schmidt (2019)	Sub-bacia	Uberlândia - MG	HEC HMS	Reservatórios de detenção	-	para TR 5, 20, 50 e 100 anos, foram, respectivamente, 182,56; 209,63; 233,10; e 244,61%.
Yin et. al. (2020)	Distrito	Zhuhai, China	SWMM e CADDIES	Cidades-esponja	28%	-
Frias e Maniquiz-Redillas (2020)	Local	Biñan, Filipinas	SWMM	Célula de biorretenção, trincheira de infiltração, jardim de chuva e telhado verde	> 80%	-
Zanandrea e Silveira (2019)	Sub-bacia	Viamão - RS	SWMM	Vala vegetada e pavimento permeável	Redução em até 14% para o TR de 2 anos	-
Paithankar, Taji (2020)	Local	Maharashtra State, India)	SWMM	Telhado verde	61,50%	-
Bai et. al. (2018)	Sub-bacia	Sucheng District - China	SWMM	Técnica LID baseada em infiltração e no armazenamento de água	54,5% a 73,1%	32,50%
Lappicy, Costa e Koide (2020)	Sub-bacia	UH Lago Paranoá e a UH Riacho Fundo no Distrito Federal	SWMM	Lagoas de detenção	11 % a 13 %	-
Song, Chum e Kim (2018)	Sub-bacia	Seoul, Coreia do Sul	SWMM	Trincheiras de infiltração	48%	48,14%

Tabela 1 – Estudos de avaliação das técnicas LID baseados em modelagem computacional

Referência	Escala	Área de estudo	Modelo	Técnica LID	Redução de escoamento	Redução da vazão de pico
Fan et. al. (2022)	Sub-bacia	Fuzhou, China	Infoworks	Retenção biológica, jardim de chuva e vala vegetada	9,75%	14,08%
Fava et. al. (2022)	Sub-bacia	São Carlos – SP	SWMM; HEC-RAS	Célula de biorretenção	-	30% a 40% para chuvas moderadas e fracas
Tejadas et. al. (2019)	Sub-bacia	Porto Alegre - RS	SWMM	Cisternas de água de chuva, Pavimentos porosos e Trincheiras de infiltração	10% a 20%	9% a 30%
Fileni, Costa e Alves (2018)	Sub-bacia	Ceilândia – DF	SWMM	Bacia de detenção e pavimentos permeáveis	-	80%
Hua et. al. (2019)	Sub-bacia	Chaohu - China	SWMM	Espaços verdes	43%	24%
Zhu et. al. (2019)	Local	Nanjing, China	SWMM	Pavimento permeável	50%	-
Pedrosa et. al. (2021)	Bacia	Teresina, Piauí	PCSWMM	Telhado verde	4,7 % a 12,13%	38,86%
Tavares et. al. (2021)	Sub-bacia	São Leopoldo – RS	SWMM	Biorretenção e telhado/reservatório verde	-	38,40%
Rodrigues e Júnior (2021)	Sub-bacia	Fernandópolis – São Paulo	SWMM	Trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e telhados verdes	-	33,72% para trincheiras de infiltração; 31,38% para pavimentos permeáveis; 31,08% empregando jardins de chuva e 12,20% com telhados verdes. Todas as medidas – 37,29%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4. METODOLOGIA

4.1. Procedimentos metodológicos

A metodologia empregada nesse estudo é dividida em três etapas: a etapa preliminar, a etapa de modelagem computacional e a etapa conclusiva. Na etapa preliminar, foram levantadas as características básicas da bacia de estudo, como o tipo de solo e a declividade, reconhecimento de campo e a realização do estudo de chuvas intensas necessários a alimentação do modelo SWMM.

De posse dessas informações, na etapa de modelagem/simulação (etapa intermediária) foram definidos os possíveis cenários para a realização da simulação computacional. Nesses cenários são definidas as técnicas LID mais adaptáveis à bacia de acordo com suas características e área disponível para instalação da LID. Ainda nessa etapa foram realizadas as simulações segundo configurações estabelecidas em cada cenário de implementação das técnicas LID escolhidas.

Por fim, a etapa conclusiva consistiu na avaliação dos cenários comparando os cenários modificados com o cenário de referência para determinação daquele com maior capacidade de redução dos efeitos dos alagamentos. Os procedimentos metodológicos empregados neste estudo são apresentados no esquema da Figura 14.

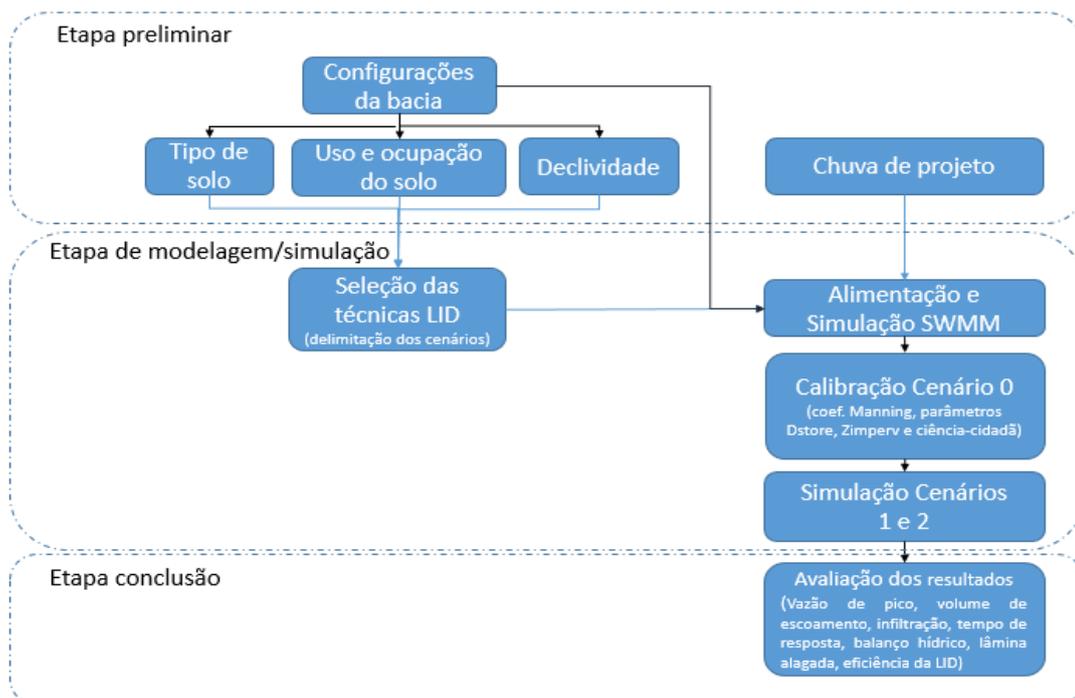


Figura 14 - Fluxograma da metodologia empregada

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no município de Caxambu-MG. O município está situado na mesorregião geográfica Sul/Sudoeste de Minas Gerais e faz parte da microrregião do município de São Lourenço. Encontra-se sob as coordenadas 21°58'20'' de latitude Sul e longitude 44° 56' 20'' a Oeste e situa-se à altitude média de 904 metros. Com uma extensão territorial de 100,50 km² (IBGE, 2021), Caxambu faz divisa a nordeste com o município de Baependi, a noroeste com Conceição do Rio Verde, a oeste com Soledade de Minas e ao sul com o município de Pouso Alto (CAXAMBU, 2015), conforme apresentado na Figura 15.

Dados do último censo demográfico realizado no país registrou no município um total de 21.705 habitantes dos quais apenas 2% residiam na área rural. Dados mais recentes do censo realizado no ano de 2022, com 100% de integralização dos setores no município, apontou redução atingindo uma população de 21.011 habitantes. A população atual representa uma densidade demográfica de 209,1 hab/km².

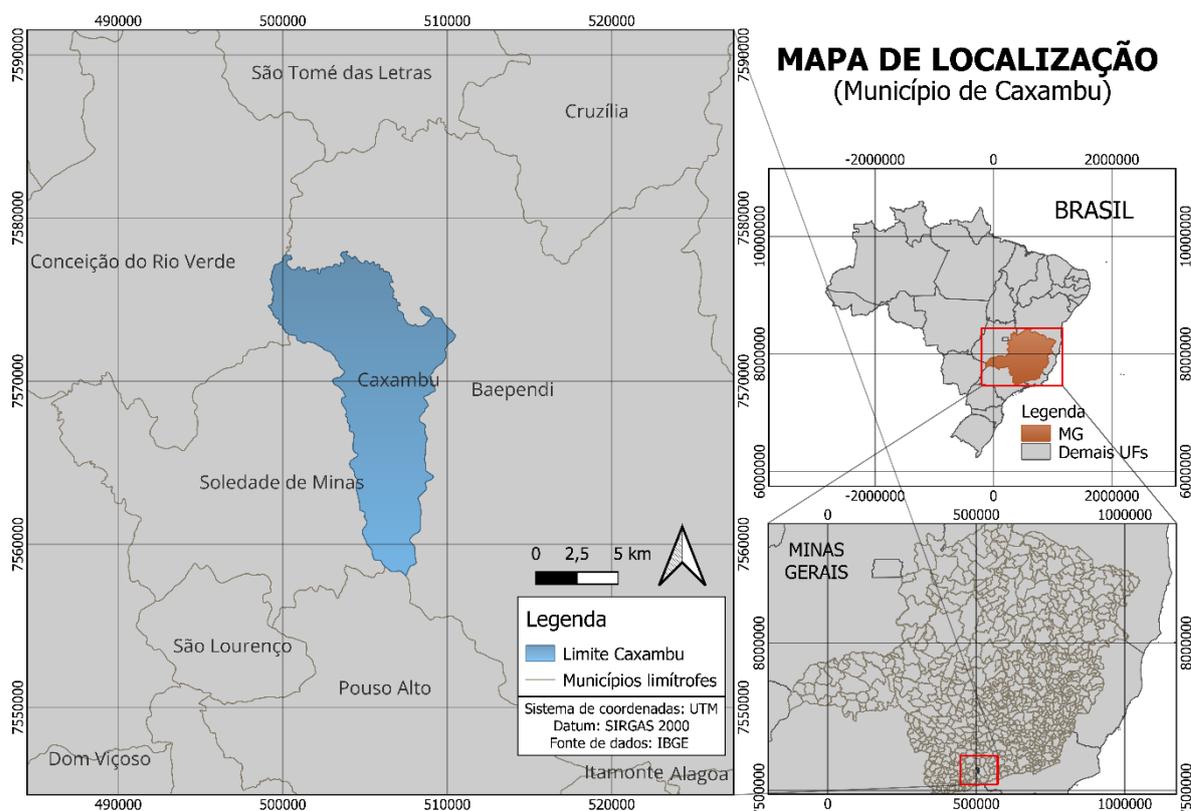


Figura 15 - Localização do município de Caxambu
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O clima do município é subtropical moderado úmido denominado pela classificação de Köppen (1948) por tropical de altitude ou Cwb (CAXAMBU, 2015). Os meses mais quentes

apresentam temperatura média de 22° C enquanto os meses mais frios apresentam temperatura média de 15° C. O período mais chuvoso na região do município acontece entre os meses de novembro a março com verão chuvoso e inverno seco característicos do tipo climático Cwb (CAXAMBU,2020), sendo a precipitação média anual do município igual a 1.470 mm (CAXAMBU, 2015).

Caxambu está inserido na bacia hidrográfica do Rio Grande e pertence à região hidrográfica da Bacia do Paraná. O município está localizado na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH) GD4 – sub bacia do Rio Verde, tributário do Rio Grande. Os principais cursos d’água do município são o Rio Baependi, localizado no limite geográfico com o município vizinho, Baependi. Além dos ribeirões afluentes do rio Baependi, ribeirão João Pedro e ribeirão Bengo e os córregos da Cachoeira, do Bengo e Mombaça, Santo Antônio, Cana-do-Reino e Invernada (Figura 16).

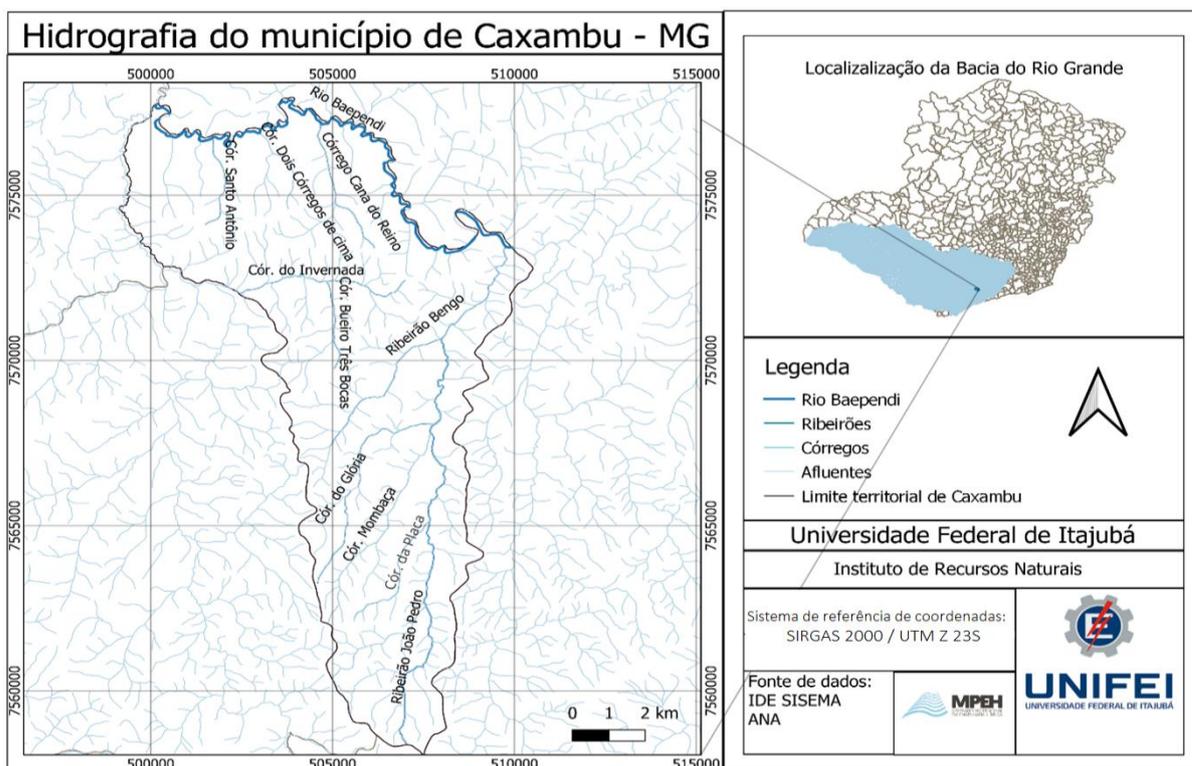


Figura 16 - Hidrografia do município de Caxambu
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Todos os cursos d’água superficiais do município drenam para o rio Baependi, afluente do Rio Verde. Em relação às águas subterrâneas, o município de Caxambu é reconhecido por sua estância hidromineral com o uso diverso das águas minerais e termais do parque turístico (CODEMGE, 2018). As águas do Parque das Águas são constituídas de sais minerais que as

conferem um poder curativo a enfermidades pela prática de seu uso terapêutico (COSTA; MENDONÇA; MAGNO, 2019).

Atualmente o Parque possui doze fontes das águas minerais usadas para o consumo humano, envasamento e posterior comercialização. Entre 1870 e 1873 foram realizados os primeiros trabalhos de captação das águas nas fontes do município (CAXAMBU, 2015). Em 1867 foi apresentado ao presidente da província um relatório de análise qualitativa das águas pelo Dr. Horta Barbosa (MONAT, 1984), mas só então em 1873 que foi designada uma comissão, pelo governo da província, para analisar quantitativamente as águas de Caxambu cujo relatório, publicado em 1874, atestou suas capacidades curativas (CAXAMBU, 2015).

O sr. Cons. João Alfredo tinha visto curas prodigiosas, obtidas em Caxambu, e movido pelo espírito de progresso, que caracterizou sempre sua passagem pelo governo, quis dar àquelas águas o seu valor terapêutico, sem o qual só empiricamente pode ser manejado um agente medicamentoso é daí que começa verdadeiramente o período científico das águas de Caxambu (MONAT, 1984).

No ano posterior à publicação da análise, obtiveram concessão para explorar as fontes e construir o estabelecimento do balneário (MONAT, 1984).

4.2.1. Área de modelagem

Este estudo buscou avaliar a implantação de medidas de mitigação de alagamentos em área urbana já consolidada, mais especificamente na área urbana do município de Caxambu que é drenada pela microbacia do Ribeirão Bengo. A região urbanizada também é banhada pelo Ribeirão João Pedro. Os pontos que apresentam problemas de drenagem pluvial em sua área urbana têm ocorrência principalmente na microbacia do Ribeirão Bengo. Essa microbacia possui cerca de 6,08 km² de área, abrangendo os seguintes bairros: Jardim das Nações, Vista Alegre, Cascatinha, Santa Tereza, Federal, Observatório, Centro, Santa Cruz, Parque dos Ipês, Trançador, Jardim Alice, Loteamento Jardim Alice II, Santa Rita, Alto Santo Rita, Santa Cruz, São Januário e a porção sudoeste do Trançador.

O ponto de análise deste estudo está localizado na área externa e nas ruas laterais do Parque das Águas Dr. Lisandro Carneiro Guimarães (Avenida Camilo Soares e rua João Carlos), pontos estes em que há ocorrência de alagamentos em decorrência da ineficiência do escoamento das águas pelo sistema de drenagem (Figura 17).

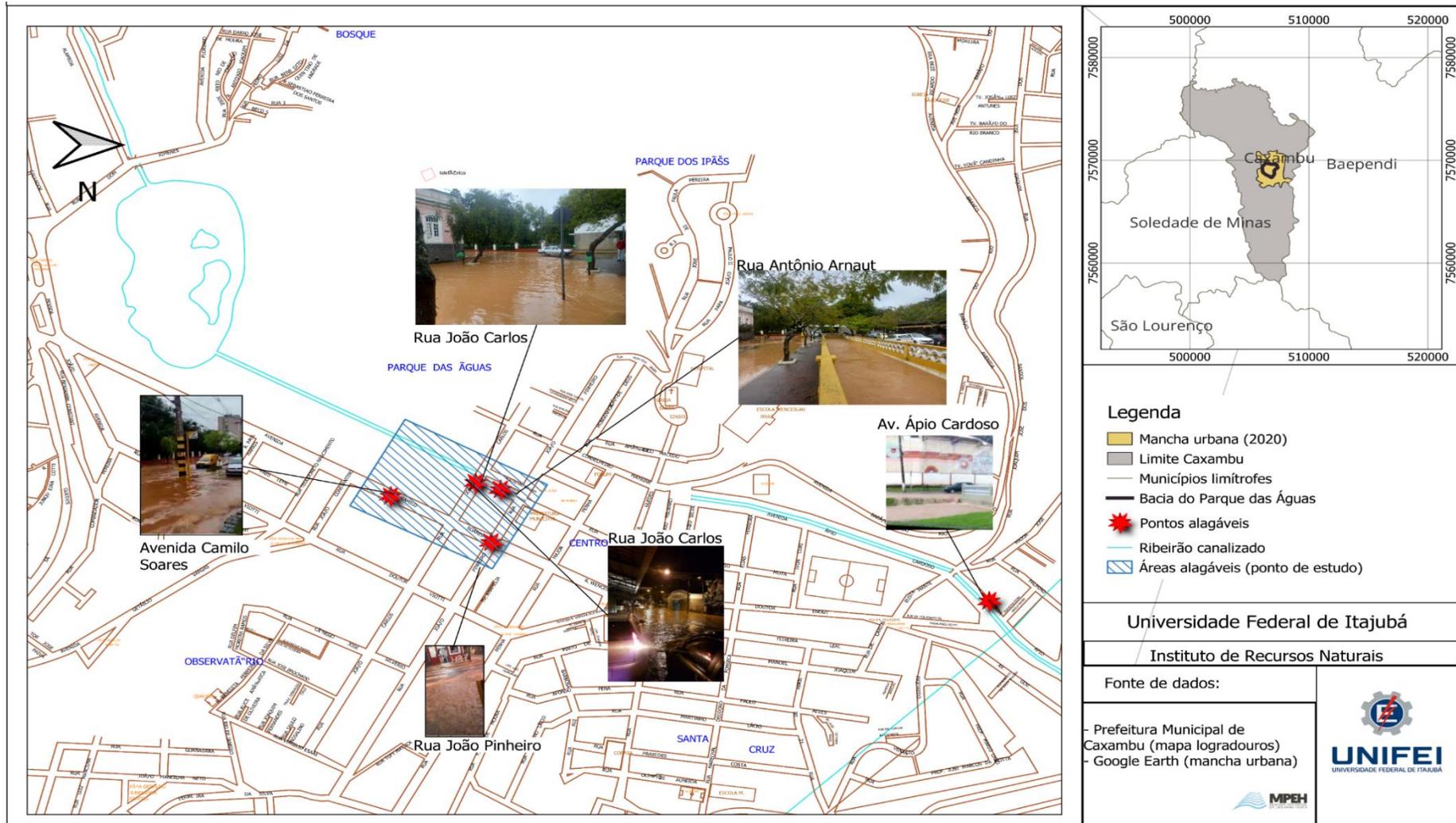


Figura 17 - Pontos com deficiência em drenagem
 Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A contribuição da água pluvial da Avenida Camilo Soares e da rua João Pedro é proveniente das ruas que deságuam do bairro Observatório que são direcionadas sob vias com alta declividade. Como todas as ruas de contribuição são pavimentadas, possuem quantidade insuficiente de dispositivos de microdrenagem e altas declividades em alguns arruamentos, o tempo de concentração da água na bacia acaba sendo reduzido, induzindo a água a atingir as áreas mais baixas em curto espaço de tempo.

A inundação de maior intensidade que se tem registro no município data do ano de 2000, época em que ocorreu na Serra da Mantiqueira eventos de inundações em muitos dos seus municípios, porém Caxambu tem vivenciado inundações e alagamentos mesmo com chuvas de menor intensidade (CAXAMBU, 2020). Os eventos de chuva de menor intensidades causam alagamentos nos pontos centrais já elencados, localizados na Avenida Camilo Soares, ponto situado em frente ao Hotel Glória (Figura 18) e na rua João Carlos (Figura 19), no ponto esquina do Parque das Águas; há também problemas com o sistema de drenagem na Rua Antônio Miguel Arnout à altura do Hotel Bragança (Figura 19) e na rua João Pinheiro (Figura 20), próximo ao Calçadão, trechos de acúmulo de águas pluviais em que o sistema de drenagem não é suficiente para captar e transportar as águas até o Ribeirão.



Figura 18 - Alagamento na Avenida Camilo Soares

Fonte: Domínio Público – imagens veiculadas na internet pela população (2022)



Figura 19 - Alagamento nas ruas Antônio Miguel Arnout (a) e João Carlos (b)
Fonte: Domínio Público – imagens veiculadas na internet pela população (2022)



Figura 20 - Alagamento na interseção da Avenida Camilo Soares (a) e rua João Pinheiro (b)
Fonte: CAXAMBU (2020)

Em função da região central do município, essas localidades são pontos onde há o funcionamento de comércio, hotelaria, ponto turístico e redes bancárias. A ocorrência de alagamento prejudica alguns comércios locais, pois inutiliza as vias até a redução do volume de água, além de afetar a trafegabilidade de pedestres. Como é possível notar na Figura 20b, a água da enxurrada atinge a área de uso dos clientes de um ponto comercial.

Associado à ineficiência do sistema de drenagem, há a existência de contribuições da rede de esgoto na rede pluvial que sobrecarrega o sistema de drenagem não dimensionado para receber a contribuição do efluente extra. Como apontado pelo prestador de serviços de

esgotamento sanitário do município no Diagnóstico do Plano Municipal de Saneamento Básico, não se descarta a hipótese de que há conexões da rede de drenagem na rede coletora de esgotos, pois, durante as chuvas, é identificado um aumento significativo da vazão de esgotos que chega à Estação de Tratamento de Esgoto do município. Além disso, o próprio levantamento indicou que os moradores apontam notar mau cheiro proveniente das bocas de lobo após as chuvas, sendo este um indicativo possível da interligação da rede de esgoto à rede pluvial.

O alagamento recorrente na Avenida Camilo Soares também pode ser afetado pela interferência da capacidade de escoamento do Ribeirão Bengo, pois recebe a contribuição da rede de drenagem das avenidas adjacentes que deságuam em toda sua extensão. Dependendo do nível de água na calha, há a possibilidade de ocorrência de remanso. Além disso, segundo gestor da drenagem urbana do município, não são realizadas com frequência a limpeza das bocas de lobo existentes, das quais é identificado a presença de raízes e galhos que acabam causando o entupimento das galerias que conduzem água ao canal do ribeirão. Ademais, em alguns trechos, há variabilidade de largura e profundidade variando a capacidade de suporte. Sua maior extensão de seção retangular, a variabilidade das seções transversais ao longo de sua extensão e sua pequena declividade também não favorecem o ganho de velocidade do escoamento.

4.3. Bacia hidrográfica de estudo e parâmetros

Para fins de localização, a região de estudo foi delimitada considerando o caminho preferencial dos fluxos. Considerando que o Parque das Águas é o principal ponto de referência existente próximo ao local de estudo, o nome da bacia de análise será adotado como Bacia Hidrográfica incremental Parque das Águas (BHIPA). A bacia foi delimitada com auxílio das curvas de níveis geradas a partir do modelo digital de elevação (MDE) Alos Palsar. O MDE Alos Palsar é proveniente de dados do radar de abertura sintética de banda tipo L, acoplado ao satélite Alos. Esse MDE é disponibilizado de forma gratuita com resolução espacial de 12,5 m pela *Alaska Satellite Facility* (PEREIRA et. al., 2019). A BHIPA foi delimitada considerando as áreas de contribuição no seu entorno e os limites geográficos das montanhas existentes na região. O mapeamento resultou na delimitação da bacia correspondente a área de 1,31 km² (Figura 21). Contudo, ao analisar as contribuições para os pontos de alagamentos, notou-se que a área que efetivamente contribui para a drenagem é menor, assim, a BHIPA foi delimitada apenas para fins de localização do ponto de análise sendo a área de contribuição delimitada internamente à BHIPA (região com limites tracejados em amarelo), conforme indicado na

Figura 21 que contém o limite das áreas de drenagem da bacia de contribuição de drenagem e da área de estudo.

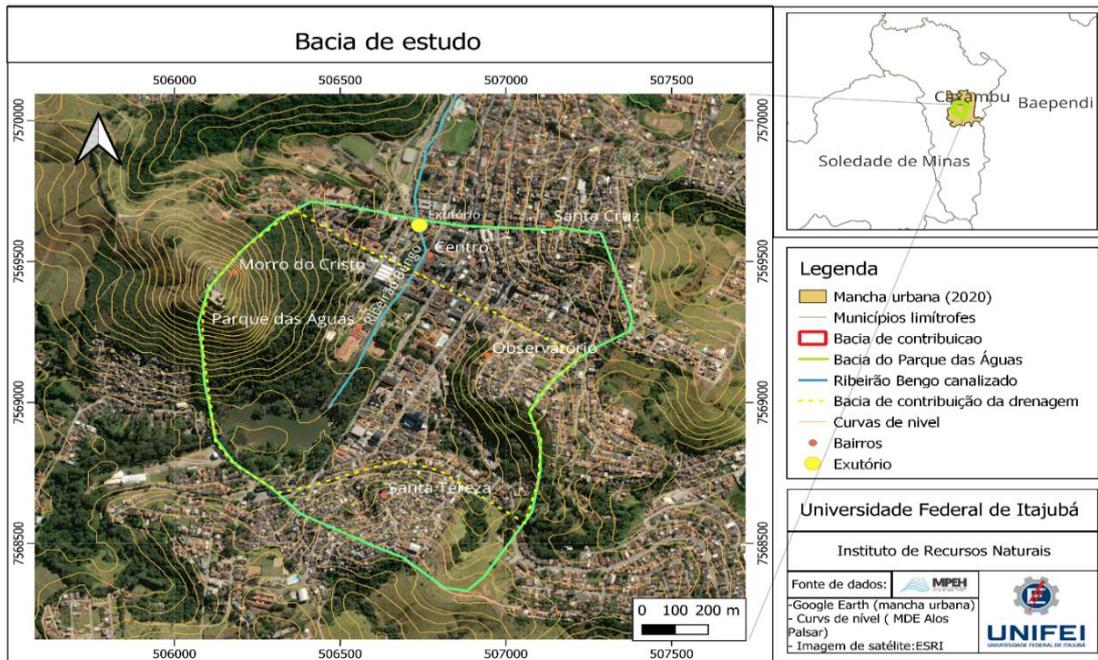


Figura 21 - Bacia Parque das Águas
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A delimitação das sub-bacias simuladas foi feita a partir do MDE, apresentado na Figura 22 (resolução de 8 cm) gerado com os dados de topografia coletados por aerolevantamento com drones e disponibilizados pela empresa DAC Engenharia.

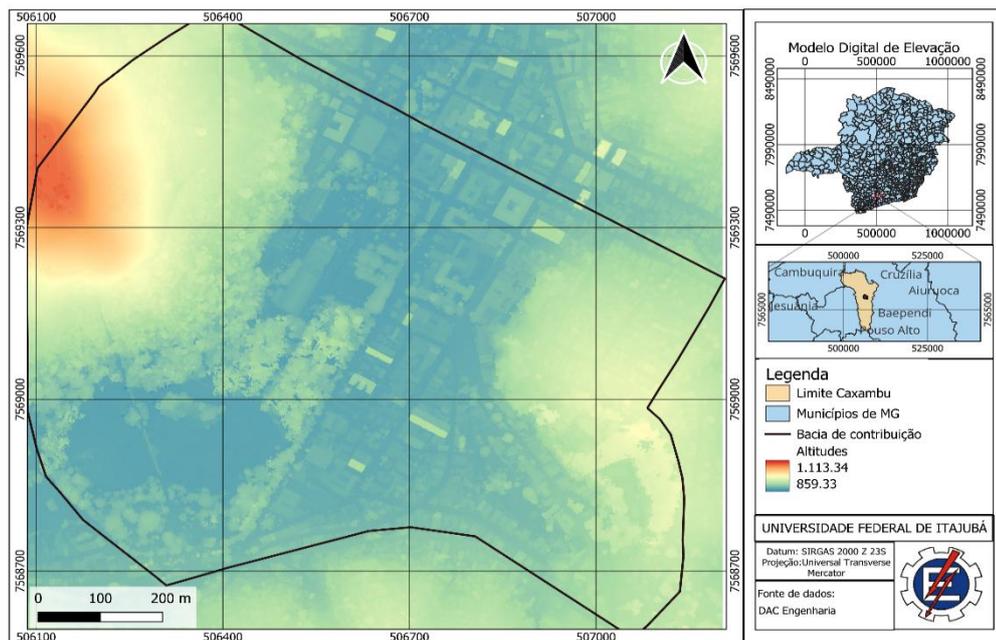


Figura 22 - MDE da bacia de contribuição
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.3.1. Declividade

O mapa de declividade da bacia foi gerado a partir do MDE da bacia empregando a classificação de relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1979):

- Plano: superfície topográfica esbatida (suavizada) ou horizontal com desnivelamentos pequenos e predominância de áreas com declive de 0 a 3 %;
- Suave ondulado: superfície com topográfica pouco movimentada, constituída de colinas ou outeiros (altitudes de 50 a 100m) e característica de declives suaves, com predominância de áreas com declividades que variam de 3 a 8%;
- Ondulado: topografia constituída por conjuntos de colinas e ou outeiros, com predominância de áreas com declives de 8 a 20%;
- Forte ondulado: superfície de topografia movimentada formada por outeiros e/ou morros (altitudes relativas entre 100 e 200m) com expressiva ocorrência de declives de 20 a 45%;
- Montanhoso: topografia vigorosa, abundantemente acidentada e usualmente constituída por morros, maciços e alinhamentos montanhosos, com desnivelamentos grandes da ordem de 45 a 75% e,
- Escarpado: áreas com predomínio de formas abruptas por meio de escarpamentos como: apardos, itambés, frentes cuestas, falésias, vertentes de declives muito fortes de vales encaixados, entre outros, com declive acima de 75%.

4.3.2. Composição do uso e ocupação do solo

Para a análise do uso e ocupação do solo da bacia foi usada a mesma imagem do levantamento aéreo. Na classificação do uso do solo foram adotadas as classes: Vegetação densa, que compreende a vegetação de árvores de pequeno a grande porte; Vegetação rasteira, que compreende as plantas de porte rasteiro, como arbustos, gramas e vegetação de pastagens; Ocupação, classe constituída de edificações; Solo exposto, compreendido por solo sem vegetação, pavimentação ou construção; Pavimentação/ruas, classe constituída pelas avenidas e ruas pavimentadas com paralelepípedos, asfalto ou bloquetes e, a classe Corpo d'água, representando o curso d'água existente.

4.3.3. Composição pedológica

Para a composição pedológica da bacia foi utilizada a delimitação de solos elaborada pela Universidade Federal de Viçosa em parceria (UFV) em conjunto com a Universidade

Federal de Lavras (UFLA). A composição compõe um material cartográfico na escala 1:650.000 abrangendo todo o estado de Minas Gerais.

4.3.4. Tempo de concentração da bacia

Foi determinado também o tempo de concentração da bacia que consiste no tempo de viagem da gota da água da chuva considerando o ponto de início de seu escoamento até alcançar o exutório (COLLISCHON; DORNELLES, 2013). O Tempo de Concentração (TC) é estimado a partir das características geomorfométricas da bacia por meio de equações empíricas. Silveira (2005) aponta bom desempenho no emprego dos métodos de Carter, Desbordes, Schaake e Kirpich nas bacias do meio urbano (Quadro 5). Ainda que a equação de Schaake sugira a aplicação em bacias com áreas inferiores a 0,62 km², devido à proximidade da área da bacia ao ponto de controle da equação, também foi aplicada esta equação neste estudo para verificar a possível convergência dos valores encontrados para o TC da bacia.

Quadro 5 - Equações do tempo de concentração adotadas no estudo

Método	Equação	Sugestão de aplicação
Carter	$T_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$	Área da bacia < 11 km ²
Desbordes	$T_c = 0,0869 \cdot A^{0,3039} \cdot S^{-0,3832} \cdot (A_{imp})^{-0,4523}$	Área da bacia < 51 km ²
Schaake	$T_c = 0,0828 \cdot L^{0,24} \cdot S^{-0,16} \cdot (A_{imp})^{-0,26}$	Área da bacia < 0,62 km ²
Kirpich	$T_c = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$	Área da bacia < 27 km ²
Piccking	$T_c = 0,0883 \cdot A^{0,667} \cdot S^{-0,333}$	Área da bacia < 11 km ²
Método SCS	$T_c = \frac{2,6 \cdot L^{0,8} \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,7}}{1140y^{0,5}}$	2 km ² < A < 2600 km ²

Fonte: Silveira (2005)

Dentre as equações, os parâmetros são dados nas seguintes unidades:

- T_c: Tempo de concentração [h]
- A: Área da bacia [km²]
- A_{imp}: Área impermeável [km²]
- L: Comprimento do talvegue [km]
- S: Declividade [m/m]
- y: Declividade [%]
- S: Parâmetro de armazenamento do solo do método SCS
- CN: Curva número

4.4. Estudo de chuvas intensas

4.4.1. Levantamento de dados pluviométricos

O estudo de chuvas intensas permite conhecer as características temporais e espaciais que subsidiam estudos hidrológicos e o planejamento de uso dos recursos hídricos (CARDOSO; ULLMANN; BERTOL, 1998). O conhecimento das características das precipitações extremas tem aplicação essencial nos projetos de drenagem e nas obras hidráulicas, pois:

O dimensionamento de vertedouros, barragens, canais, desvios de cursos d'água, galerias pluviais, bueiros, sistemas de drenagem e irrigação, práticas mecânicas de controle da erosão hídrica do solo, dentre outros, deve levar em conta a magnitude e a frequência das enxurradas, caracterizadas pela duração e intensidade das chuvas intensas (CARDOSO; ULLMANN; BERTOL, 1998).

Sendo assim, a fim de determinar a chuva de projeto para a simulação, foi realizado o estudo de chuvas intensas para a bacia de estudo com base nos dados hidrológicos. Os postos com registro de dados disponíveis no sistema Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), dos quais há proximidade à bacia de estudo são apresentados na Figura 23 e Tabela 2.

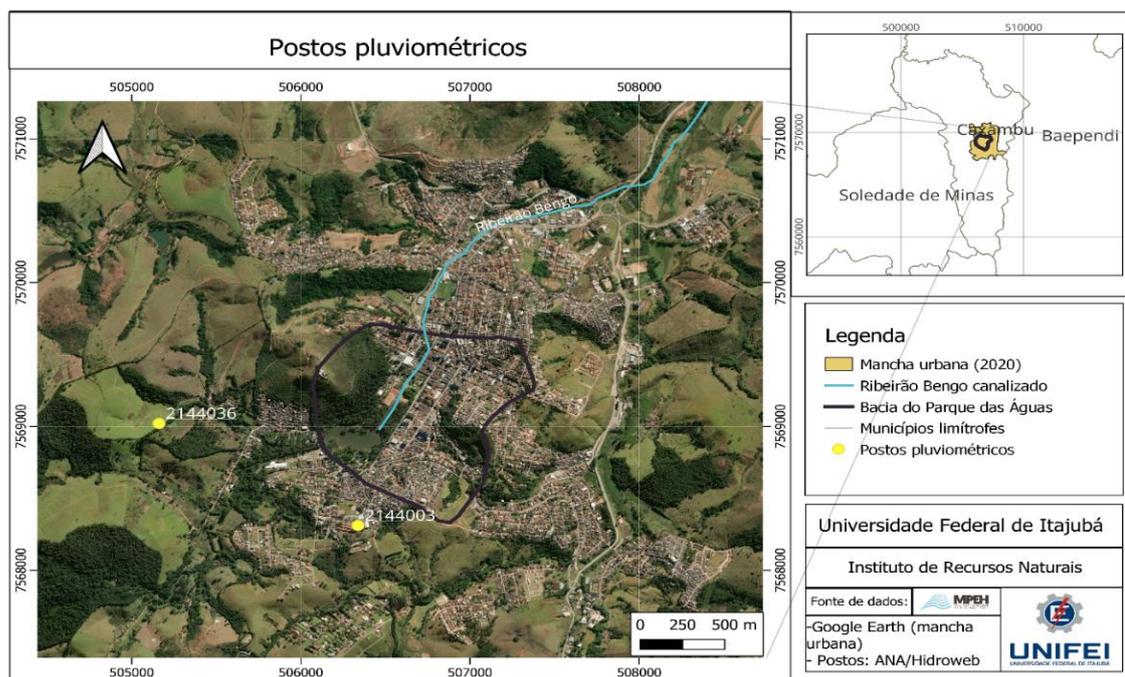


Figura 23 - Localização dos postos pluviométricos de Caxambu-MG

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Um dos postos está sob a responsabilidade do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (Cód. 2144036), porém apresenta apenas dados brutos com uma série histórica de 22 anos. O posto sob a responsabilidade do IGAM- MG, Instituto Mineiro de Gestão das

Águas (Cód. 2144003) tem duas séries históricas: uma série com 81anos de registro de dados brutos e uma série histórica com 58 anos de dados consistidos.

Tabela 2 - Postos pluviométricos pertencentes ao município de Caxambu - MG

Código posto	Coordenada		Responsável	Período de dados	Tipo de dados
	Latitude	Longitude			
2144003	-21.9897	-44.9386	IGAM - MG	Jan/1941 - set/2022 Jan/1941 - dez/1999	Brutos Consistidos
2144036	-21.9833	-44.9500	INMET	Ago/1976 -dez/1998	Brutos

Fonte: ANA (2023)

4.4.2. Estudo da série temporal

Posteriormente foi realizado o processo de análise da frequência das chuvas por meio do estudo da série temporal, que consiste em determinar o tempo em que uma precipitação é igualada ou superada. O processo de estimativa de precipitações raras e suas respectivas probabilidades são elementos essenciais para qualquer projeto de infraestrutura hídrica. A abordagem convencional para determinar as estimativas dos quantis é a análise local de frequência de variáveis hidrológicas que consiste em ajustar uma função de distribuição de probabilidades a uma amostra hidrológica ou climatológica de observações (DE LIMA; NAGHETINNI,2001). Para esse ajuste, os registros de precipitações foram organizados em ordem sequencial do maior ao menor índice pluviométrico segundo distribuição empírica de Weibull e ajustados por meio das distribuições teóricas de probabilidade Gumbel (Extremo Tipo I), Log Pearson Tipo III e Log normal.

Dentre os diversos modelos probabilísticos, não há um consenso entre os especialistas e hidrólogos sobre qual a função de probabilidade é a mais adequada para a análise de frequência de variáveis hidrológicas (DE LIMA; NAGHETINNI,2001). Na prática, essa escolha é dada em função da aderência do modelo proposto a observações hidrológicas anuais submetidas a testes de independência, homogeneidade e existência de pontos destoantes como *outliers* (DE LIMA; NAGHETINNI,2001).

Neste estudo, os testes de aderência foram executados por meio do software ALEA (Análise de Frequência Local de Eventos Anuais), uma ferramenta desenvolvida em linguagem Visual Basic e em ambiente Windows pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O programa ALEA emprega

os métodos dos momentos (MOM), da máxima verossimilhança (MMV) e momentos L (MML) para estimar os parâmetros (e quantis) das principais distribuições de probabilidades usadas na análise de frequências de eventos hidrológicas mínimos, médios e máximos. (UFMG, s.d.)

4.4.3. Desagregação e distribuição temporal da chuva

As alturas de chuva obtidas pelo estudo da série temporal são atribuídas a chuvas diárias (total acumulado em um dia no intervalo de medição). No entanto, a precipitação diária não é usual para aplicações, sendo mais adequado o emprego de chuvas com menores durações, as quais podem ser obtidas por meio de correlação com a chuva máxima no intervalo contínuo de 24h (precipitação de 24h). Para obter a precipitação de 24h, Santos (2015) cita os estudos de Genovez e Pegoraro (1998) que obtiveram, a partir de estudos com dados de 23 pluviógrafos do estado de São Paulo, o coeficiente médio aplicável à chuva diária no valor de 1,11. Os autores também citam Torrico (1987), que obteve o coeficiente no valor de 1,095 para o Brasil (Equação 10).

$$P_{24h} = 1,095 * P_{1dia} \quad (10)$$

As chuvas de menores durações, são obtidas por meio da desagregação da precipitação de 24h. Neste estudo, optou-se por adotar a metodologia de Torrico (1987). Neste método, dada a precipitação de determinado tempo de retorno (TR) pelo estudo das frequências de chuvas, deve-se aplicar o coeficiente cujo pelo percentual correspondente ao TR e a Isozona (Figura 24) a qual a região está inserida, obtendo-se assim as chuvas com durações de 1 hora (1h/24h) e 6 minutos (6min/24h) nas relações com a chuva de 24 horas (Figura 24). A partir das precipitações de 6 minutos, 1 hora e 24 horas é possível determinar as precipitações intermediárias por interpolação da curva gráfica desses três valores.

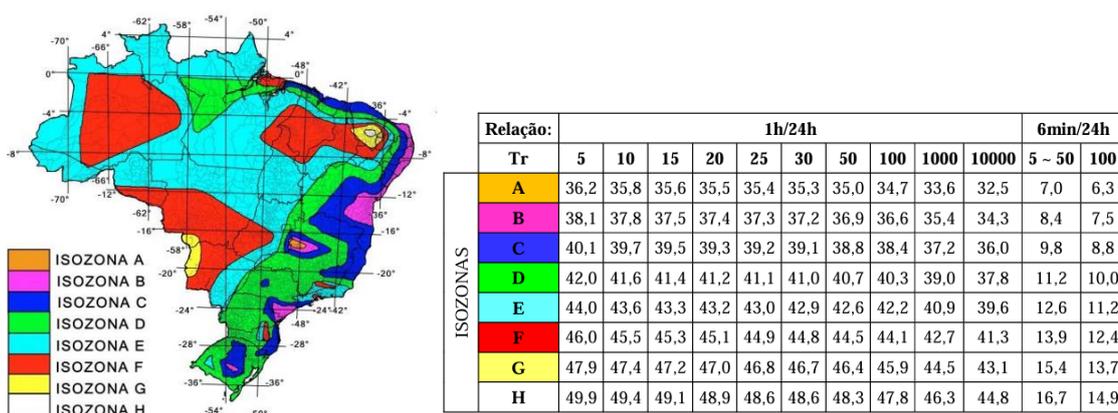


Figura 24- Mapa de Isozonas e Coeficientes de desagregação do método de Isozonas
Fonte: Santos (2015); Torrico (1987) apud Santos (2015)

A partir dos valores de chuva obtidos na distribuição espacial é necessário transformá-la em um hietograma de projeto, que servirá para alimentar o modelo SWMM. Para isso, é necessário distribuir temporalmente a chuva ao longo da duração da chuva de projeto.

Com a distribuição temporal, consegue-se compreender o comportamento da chuva no intervalo de sua duração. O método aqui adotado para distribuir a chuva temporalmente será o método de Huff que classifica as precipitações em quatro classes, com durações distribuídas em quatro partes iguais. Nesse método, por meio da análise de 261 eventos de precipitação em uma série de 11 anos de dados, e duração de 30 min a 48 horas, uma precipitação isolada foi determinada como chuva intensa, separada da precipitação que a antecede, em um intervalo superior a 6h. Pela análise dos eventos de chuva e sua variabilidade, as distribuições temporais em termos de probabilidade, analisadas estatisticamente para cada quartil, resultou em curvas de distribuição temporal adimensionais associada a uma probabilidade de excedência (Abreu; Sobrinho; Brandão, 2017).

Neste estudo, foi empregada a distribuição aplicável a durações menores que 2h, dada pelas curvas de Huff 1º Quartil com probabilidade de excedência de 50% e passo de 1 minuto.

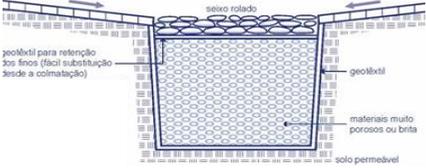
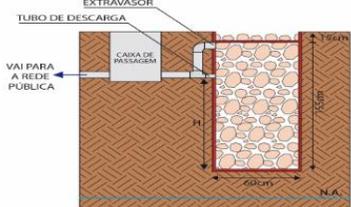
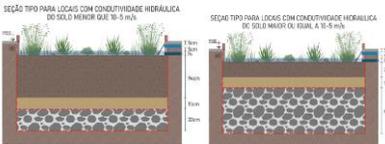
4.5. Modelagem no SWMM

Para a modelagem hidrológica foi empregado o software SWMM na versão 5.2 (inglês).

4.5.1. Tipos de LID selecionadas

As técnicas LID foram escolhidas em função da disponibilidade de área na bacia. Neste projeto foram adotados os telhados verdes, pavimento permeável, trincheira, poço de infiltração e jardim de chuva. As dimensões das estruturas foram determinadas de acordo com as recomendações da Instrução Técnica de Drenagem Urbana do município de Belo Horizonte - MG (BELO HORIZONTE, 2022) adotando valores e funções padronizados para cada tipo solo e o Manual de Drenagem Urbana de Curitiba-PR (CURITIBA, 2002) cujas equações necessárias para o dimensionamento são apresentadas no Quadro 6. Para os telhados verdes, foram adotadas as espessuras das camadas determinadas pelo Manual de Curitiba-PR.

Quadro 6 - Método para pré-dimensionamento das técnicas LID

Estrutura	Pré-dimensionamento	Variáveis
<p>Pavimento permeável</p>  <p>concreto ou asfalto poroso 5 a 10cm de espessura filtro granular com 2,5cm de espessura e agregado de 1/2 pol reservatório de pedra com agregado de 1 a 3 pol filtro geotêxtil solo existente</p>	$I = \frac{a \cdot T_r^b}{(t+c)^b} \quad Q_{m\acute{a}x} = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad \beta = \frac{A_{pav} + CA}{A_{pav}}$ $V_a = (7,11 \cdot \sqrt{\beta} \cdot T_r^{0,129} - 0,64 \cdot \sqrt{q_s})^2$ $H = \frac{V_a}{10 \cdot n}$	<p>I: intensidade [mm/h]; Tr: Tempo de retorno [anos]; t: duração da chuva [min]; a, b, c = parâmetros da IDF local q_s: vazão de saída constante do dispositivo [m³/s] Q_{máx}: vazão [mm.h⁻¹]; Ac: Área de contribuição [m²]; Apav: área do pavimento [m²]; C: coef. escoamento da bacia; A: área de contribuição do pavimento; V_a: volume de armazenamento [m³] n: Porosidade do material de enchimento; H: Espessura da camada de armazenamento [cm].</p>
<p>Poço de infiltração</p>  <p>seio rolado geotêxtil para retenção das fibras (fácil substituição desde a colmatação) geotêxtil materiais muito porosos ou brita solo permeável</p>	$\beta = \frac{4CA}{\pi D^2} \quad \gamma = \frac{4}{D} \quad q_s = \alpha K_{sat}$ $k_1 = 7,11b^{0,5} T^{0,129} \quad k_2 = 0,64\gamma^{0,5} q_s^{0,5}$ $nH = (k_1 \cdot k_2)^2 \quad H = \frac{k_1 \cdot (k_2 - \sqrt{n})^2}{10 \cdot n \cdot k_2}$ $V_a = (7,11 \cdot \sqrt{\beta} \cdot T_r^{0,129} - 0,64 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{q_s})^2$	<p>D: diâmetro do poço [m]; α: fator de colmatação K_{sat}: condutividade hidráulica saturada do solo [mm.h⁻¹] Y: razão entre a área de percolação e a área do dispositivo em planta, dividida por H [mm⁻¹] q_s: vazão de saída constante do dispositivo [mm.h⁻¹] Demais parâmetros, idem ao pavimento permeável</p>
<p>Trincheira de infiltração</p>  <p>EXTRAVASADOR TUBO DE DESCARGA CAIXA DE PASSAGEM VAI PARA A REDE PÚBLICA 1,60m 0,60m N.A.</p>	$L_a = 0,248C \cdot A - 0,315 \cdot A$ $L_b = 0,2754C \cdot A - 0,0284A$ $L_c = 0,2597C \cdot A - 0,0268A$	<p>Comprimento da trincheira para: L_a: solo com k ≥ 10⁻⁵ m/s [m] L_b: para solo com k entre 10⁻⁶ a 10⁻⁵ m/s [m] L_c: para solo com k entre 10⁻⁶ a 10⁻⁷ m/s [m] A: área de contribuição [m²] C: coeficiente de escoamento Altura padrão de 1 m e largura de 0,60m</p>
<p>Jardim de chuva</p>  <p>SEÇÃO TIPO PARA LOCAIS COM CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO MENOR QUE 10⁻⁵ m/s SEÇÃO TIPO PARA LOCAIS COM CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO MAIOR OU IGUAL A 10⁻⁵ m/s</p>	$A_j = \frac{C \cdot A}{5}$ $h_a = -19,91C^2 + 42,165C - 6,2646$ $h_b = -23,67C^2 + 45,602C - 10,2013$	<p>A_j: Área em planta do jardim de chuva [m²] C: Coeficiente de escoamento superficial da área de contribuição A: Área total ao jardim de chuva [m²] h_a: Altura da camada de armazenamento superficial para locais cujo solo possui k ≥ 10⁻⁵ m/s [cm] h_b: Altura da camada de armazenamento superficial para locais cujo solo possui k < 10⁻⁵ m/s [cm]</p>

Fonte: Adaptado de Curitiba (2002); Belo Horizonte (2022)

4.5.2. Idealização dos cenários

Foram adotados dois cenários, o cenário 00, que representa a bacia e suas configurações atuais sem nenhuma técnica LID implantada. O cenário 01 que representa a bacia modificada com algumas técnicas LID selecionadas (Jardim de chuva; Pavimento permeável e 50% de telhados verdes) e o cenário 02 prevendo a inserção de uma capacidade maior de medidas na bacia (Jardim de chuva; Pavimento permeável, Poço e trincheira de infiltração e 100% de telhados verdes).

4.5.3. Simulação e validação

Como já elencado, esse estudo não possui dados de vazão uma vez que é simulado para um cenário de microdrenagem. Para auxiliar na calibração do modelo será adotado a estimativa de níveis de lâmina d'água obtidas via ciência cidadã para a Avenida Camilo Soares.

Na data de 01 de dezembro de 2021 foi registrado um evento de precipitação acumulado em 52,3 mm, responsável por gerar alagamento no local (Figura 25).



Figura 25 - Evento de chuva em dezembro/21

Fonte: Domínio Público – imagens veiculadas na internet pela população

Outro evento, que também gerou alagamentos na área estudada aconteceu em 10 de dezembro de 2015 (Figura 26), com altura de chuva de 10,4 mm, ambos registrados pelo posto pluviométrico da ANA (responsabilidade do IGAM - 02144003). Embora o registro pluviométrico captado pelo posto na data do evento de 2015 tenha apresentado um volume de precipitação acumulado de baixa magnitude, na referida data foi identificado uma lâmina de alagamento considerável. O evento pode estar associado a uma chuva com distribuição temporal mais intensa e de pequena duração para que tenha gerado o alagamento, além disso,

não se descarta a possibilidade de que o posto tenha registrado falha na leitura acumulada do índice de precipitação tendo em vista que o evento está registrado no período de dados que não foram consistidos do posto do IGAM.



Figura 26 - Evento de chuva em dezembro/15

Fonte: Domínio Público – imagens veiculadas na internet pela população

A determinação da lâmina d'água neste local pôde ser identificada por meio da análise das imagens e vídeos veiculados nas mídias sociais, à época. Pelas imagens, nota-se que, a lâmina d'água chega a alcançar um nível próximo à borda da mureta de jardim existente no local, porém sem ultrapassá-la. A mureta possui uma borda arredondada com altura cerca de 32 cm e altura referente à face paralela à avenida, com 25 cm (Figura 27 e Figura 28).



Figura 27 - Altura da mureta no trecho paralelo à pista (a) canto curvo (b)



Figura 28 - Altura da mureta de jardim existente no local

Considerando que há uma diferença entre a borda da mureta e a lâmina d'água, pode-se considerar que a água atingiu um nível entre 20 a 25 cm de altura durante os eventos de chuva que formaram os alagamentos. Esse valor será o norteador para a simulação de um evento que registre neste ponto de medição um nível de lâmina d'água dentro dessa faixa de valores para calibração do modelo com o cenário zero, aquele que caracteriza um cenário isento de técnicas LID e, portanto, vulnerável à ocorrência de alagamentos.

Considerando que esses eventos de alagamento ocorrem em média uma vez ao ano, foi adotado uma precipitação com período de retorno de um ano para calibrar o modelo. A calibração foi realizada de forma manual, por tentativa e erro, variando o Curve Number das sub-bacias, o coeficiente de rugosidade e os parâmetros de armazenamento (taxa de área impermeável sem armazenamento em depressão e profundidade de armazenamento em depressão nas áreas impermeáveis) de modo que os resultados encontrados na simulação do evento esperado para um ano alcançasse a lâmina observada com valores próximos a 26 cm. Para a verificação da proximidade dos dados foram avaliados apenas a diferença relativa em relação ao valor esperado e o resultado estimado pelo modelo. Os resultados da calibração serão abordados no item 5.4.1.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características da bacia

Conforme metodologia adotada para classificação de relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1979) descrita no item 4.3.1, a Bacia hidrográfica incremental do Parque das águas (BHIPA) é composta em maior parcela pelo relevo forte ondulado sendo identificado em sua região central a predominância do relevo suave ondulado. A partir da Figura 29 é possível identificar que as áreas localizadas nas bordas ou áreas próximas às bordas do limite da bacia compõem-se de áreas montanhosas com relevo forte ondulado tanto a noroeste, leste e sul da bacia. Essa variação contribui para que a água escoe com maior velocidade que, associado ao tipo de pavimentação, alcança com menor tempo de percurso as áreas centrais, mais baixas e mais planas da bacia, favorecendo assim a ocorrência de alagamentos.

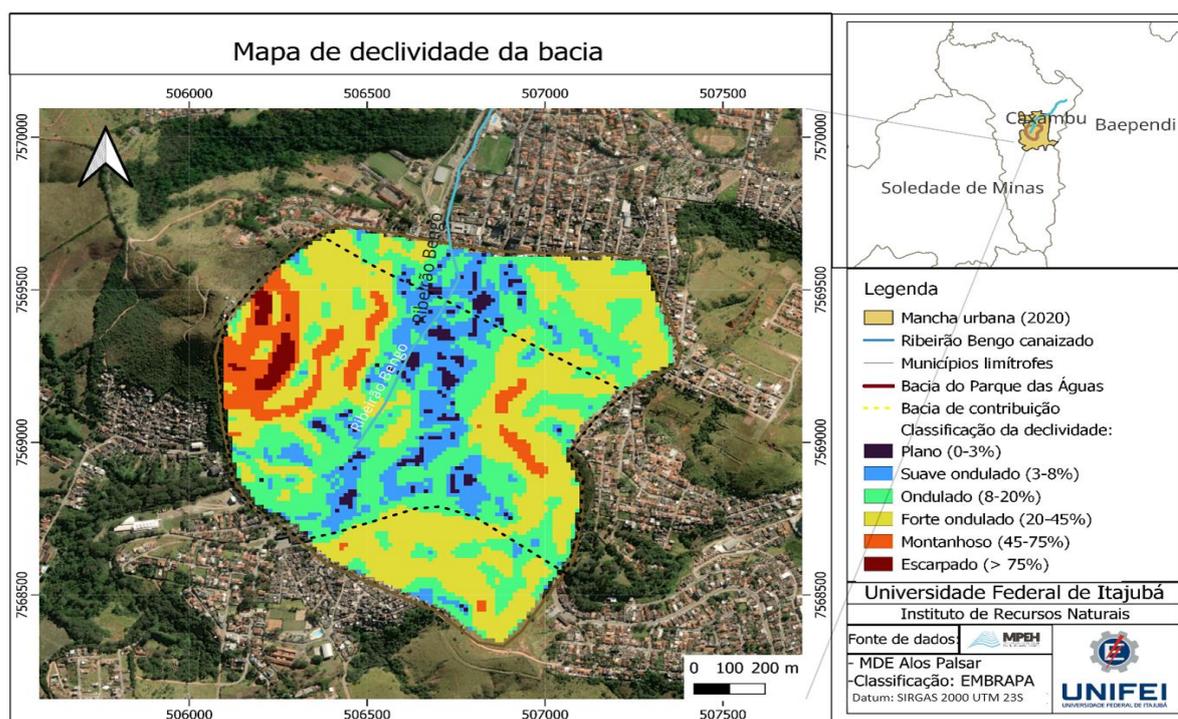


Figura 29 - Mapa de declividade da bacia Parque das Águas
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Quanto à composição pedológica, o município é composto pelos solos PVd1 (Argissolo Vermelho), PVAe7 (Argissolo vermelho-amarelo) e LVAd1 (Latossolo vermelho-amarelo). A BHIPA é composta pelo solo PVd1 – Argissolo vermelho, distrófico típico A moderado/fraco textura média/argilosa; fase floresta subperenifólia, relevo forte ondulado (MINAS GERAIS, 2010), conforme identificado na Figura 30.

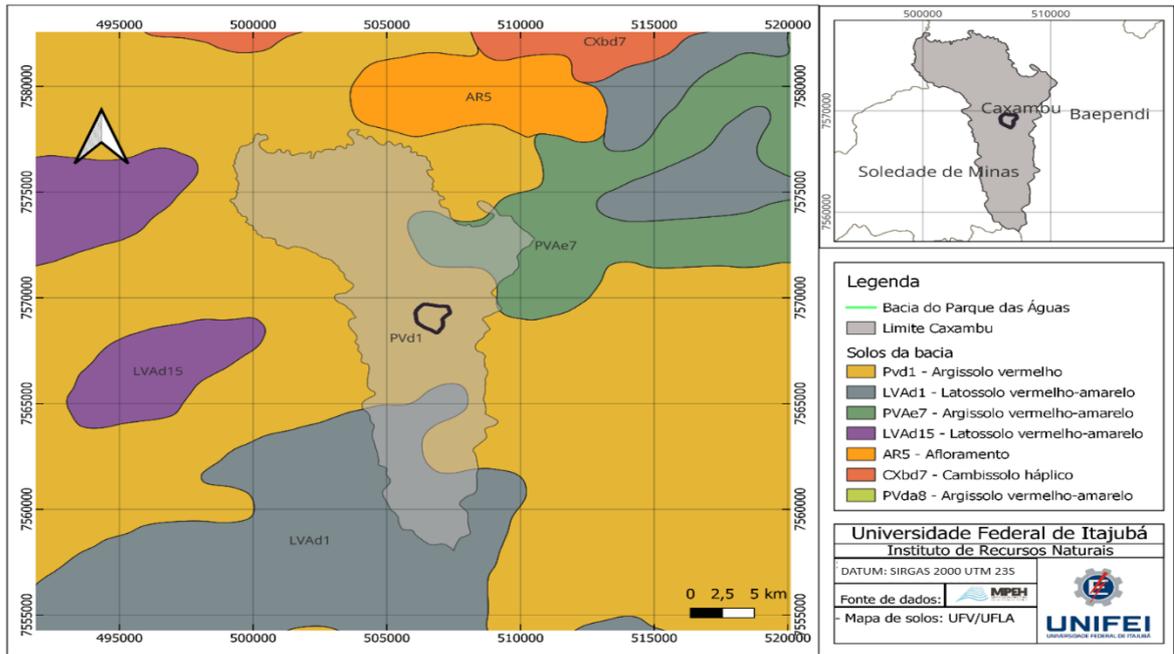


Figura 30 - Mapa de solos da bacia Parque das Águas

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A distribuição das classes de uso do solo identificadas na bacia de estudo (Figura 31) é composta majoritariamente por vegetação densa (48,88%), seguida das classes de ocupação (18,82%), pavimentação (13,59%), vegetação rasteira (12,43%), corpo d'água (5%) e solo exposto (1,28%).

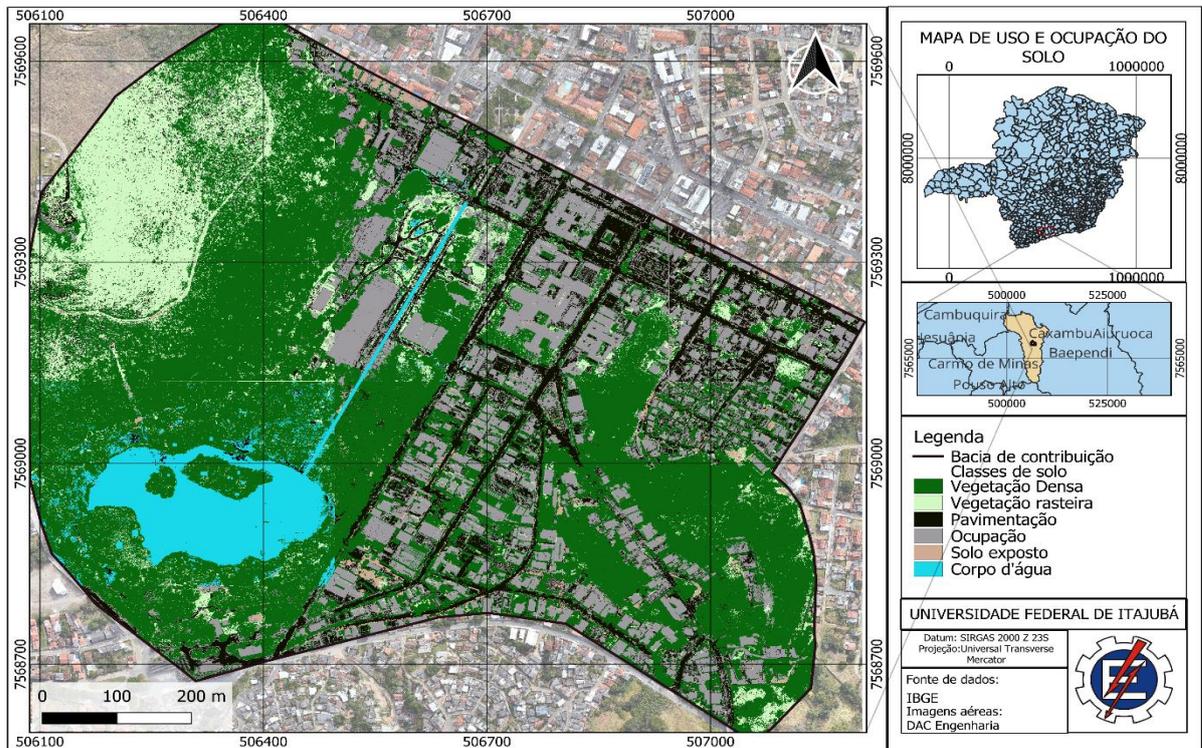


Figura 31 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia Parque das Águas

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Considerando as características geomorfométricas da bacia do Parque das Águas (Tabela 3), os tempos de concentração estimados para cada método adotado são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Características geomorfométricas da bacia

Descrição	Valor
Área total da bacia de contribuição (km ²)	0,810
Área impermeável (km ²)	0,300
Área impermeável (%)	37,00
Comprimento (km)	0,900
Declividade (m/m)	0,043

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 4 - Tempos de concentração estimados para a bacia segundo métodos empregados

Método	Tempo de concentração (min)
Carter	14,14
Desbordes	25,43
Schaake	10,35
Kirpich	12,32
Piccking	13,09
Método SCS	14,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A mediana encontrada entre os tempos de concentração estimados é equivalente a $T_c = 13,61$ min enquanto a média é $T_c = 15,03$ min. O valor encontrado para a equação de Desbordes destoa dos demais pois, embora seja aplicável em bacias urbanas, o limite de área da bacia aceitável para aplicação da equação é bem maior que as demais (vide Quadro 5). O tempo de concentração será adotado como parâmetro referência para determinar a duração da chuva crítica de projeto, sendo assim, para este estudo será adotado o tempo de concentração de 15 minutos.

5.2. Chuva de projeto

Devido à proximidade do posto do IGAM-MG e pela maior quantidade de dados registrados, para este estudo inicialmente foi adotada a série histórica de dados brutos do posto pluviométrico 2144003. Porém, ao analisar os dados da série histórica, notou-se que os valores totais mensais médios não permitiam determinar um ano hidrológico bem definido, pois pode-se observar oscilações entre os registros das médias totais mensais. Além disso, foi identificado um alto índice de falhas, dentre as quais, a maioria das falhas pertencia aos meses dos períodos mais chuvosos da região, ainda que com a tentativa de exclusão dos anos hidrológicos, as falhas

invalidaram um total de 22 anos de registros da série de dados. Portanto, foi adotado a série de dados do mesmo posto, porém com os dados consistidos.

Na Figura 32 é apresentado o comportamento das precipitações totais mensais médias registradas no posto pluviométrico adotado, caracterizando o regime pluviométrico do posto. Nota-se que o ano hidrológico deste posto corresponde ao período agosto de um dado ano a julho do ano posterior.

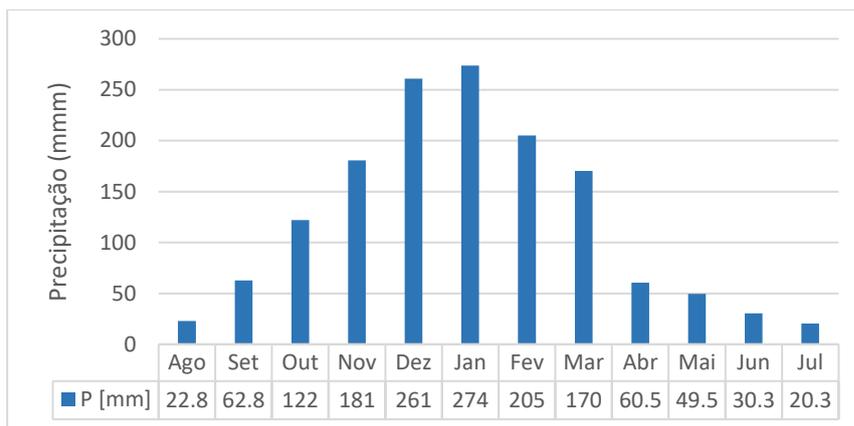


Figura 32 - Totais mensais médios registrados no Posto 2144003

Fonte: Adaptado de ANA (2023)

O processo de análise da consistência dos anos hidrológicos do posto resultou na exclusão de 9 anos hidrológicos da série, obtendo-se assim uma série de dados com 49 registros, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Precipitação máxima para cada ano hidrológico

Ano hidrológico	P máx ano hidrológico [mm]	Ano hidrológico	P máx ano hidrológico [mm]	Ano hidrológico	P máx ano hidrológico [mm]
1941 - 1942	56,00	1965 -1966	71,20	1982 -1983	88,80
1942 - 1943	163,20	1966 -1967	75,60	1983 -1984	77,20
1943 - 1944	87,00	1967 -1968	47,20	1984 -1985	65,10
1945 -1946	85,00	1968 -1969	142,80	1985 -1986	75,10
1946 -1947	72,20	1969 -1970	73,60	1986 -1987	75,20
1947 -1948	112,40	1970 -1971	76,40	1987 -1988	89,20
1951 -1952	96,80	1971 -1972	73,00	1988-1989	72,20
1952 -1953	46,20	1972 -1973	65,00	1990 -1991	89,40
1953 -1954	88,00	1973 -1974	63,00	1991 -1992	52,30
1957 -1958	57,60	1974 -1975	36,30	1992 -1993	54,00
1958 -1959	68,40	1975 -1976	41,00	1993 -1994	56,00
1959 -1960	64,40	1976 -1977	80,20	1995 -1996	120,40
1960 -1961	74,40	1977 -1978	70,30	1996 -1997	151,00
1961 -1962	94,20	1978 -1979	56,30	1997 -1998	72,00
1962 -1963	54,60	1979 -1980	70,10	1998 -1999	78,00
1963 -1964	100,40	1980 -1981	77,50	-	-
1964 -1965	70,20	1981 -1982	86,10	-	-

Fonte: Adaptado de ANA (2023)

Após o ajuste da série de distribuição de Weibull por meio das funções de probabilidade Gumbel (Extremo Tipo I), Log Pearson Tipo III e Log normal utilizando o software ALEA, obteve-se os resultados para as análises de aderência aos dados de monitoramento, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos testes de aderência

Distribuição	Kolmogorov-Smirnov (K-S)				χ^2 (Q-Q).		
	Método	p-valor	Estatística do teste	Resultado do teste	p-valor	Estatística do teste	Resultado do teste
Log-Normal	MOM	0,5313	0,1132	Aceita	0,9689	8,8725	Aceita
	MMV	0,5871	0,1085	Aceita	0,9824	10,1163	Aceita
	MML	0,5694	0,1100	Aceita	0,9788	9,7126	Aceita
Log-Pearson III	MOM	0,4674	0,1189	Aceita	0,9728	7,2065	Aceita
	MMV	0,5601	0,1107	Aceita	0,9789	7,7143	Aceita
	MML	0,5323	0,1131	Aceita	1,0000	7,7647	Aceita
Gumbel	MOM	0,5526	0,1114	Aceita	0,9573	8,1674	Aceita
	MMV	0,6356	0,1044	Aceita	0,9670	8,7362	Aceita
	MML	0,6321	0,1047	Aceita	0,9626	8,4617	Aceita

Fonte: ALEA (2023)

Ao nível de significância $\alpha = 5\%$, considerando que os p-valores encontrados são inferiores a 0,05, há evidências para aceitar as hipóteses de que os dados foram extraídos das populações Log-Normal, Log Pearson Tipo III e Gumbel. A distribuição que possui o primeiro ranking de ajuste, ou seja, aquela que possui maior aderência, é aquela que registra o maior índice do p-valor (SABINO et. al., 2021). Dentre as distribuições analisadas, a distribuição de Gumbel possui melhor ajuste pelo teste K-S, enquanto a distribuição Log-Normal, tem melhor ajuste pelo teste Q-Q. Por meio da análise visual (Figura 33) nota-se que a distribuição Log-Normal é a que mais se assemelha aos dados amostrais, sendo que os dados se apresentaram muito próximos da amostra próximo ao tempo de retorno de 15 anos. Considerando que é comum empregar tempos de retorno que variam de 2 a 15 anos para sistemas de microdrenagem (TUCCI, 2005), pode-se considerar que a partir da proximidade da distribuição à amostra, a distribuição Log-Normal é passível de ser característica dos dados empíricos.

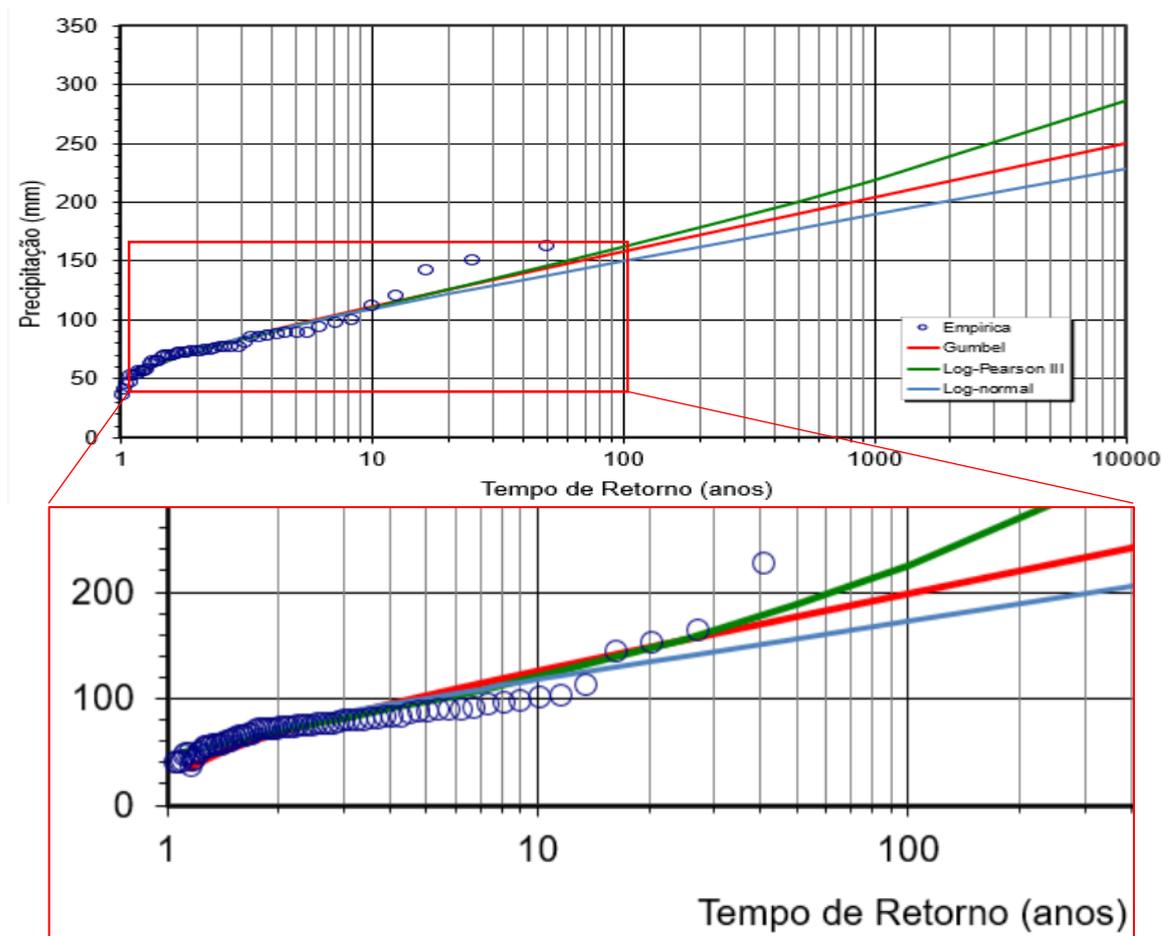


Figura 33 - Ajuste de distribuições

A partir da seleção das chuvas diárias correspondentes aos tempos de retorno recomendados para os projetos de microdrenagem (2, 10 e 15 anos), foram obtidas as chuvas de 24h e as chuvas com durações menores discretizadas pelo método das isozonas considerando que a área de estudo se encontra na isozona D (Tabela 7).

Tabela 7 - Relação entre as precipitações de 24h, 1h e 6 min segundo método das Isozonas

Duração	TR (anos)		
	2	10	15
24 h	81,04	129,24	136,69
1h	34,46	53,77	56,59
6min	8,29	13,22	13,98

As chuvas associadas às durações até três vezes a duração do tempo de concentração da bacia, obtidas por interpolação gráfica entre os volumes com durações de 24h, 1h e 6 min são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Precipitações para as durações de até três vezes o TC da bacia (mm)

Duração (min)	TR (anos)		
	2	10	15
15	18,85	29,62	31,23
20	22,69	35,75	37,72
30	28,11	44,40	46,86
38	31,26	49,44	52,20
40	31,95	50,54	53,35
45	33,52	53,05	56,01

Para a simulação inicial de pré-calibração, os hietogramas dos quantis anteriores foram determinados com a discretização temporal segundo o método de Huff 1º Quartil, sendo posteriormente selecionados os hietogramas de projeto para as chuvas associadas à duração crítica (Figura 34).

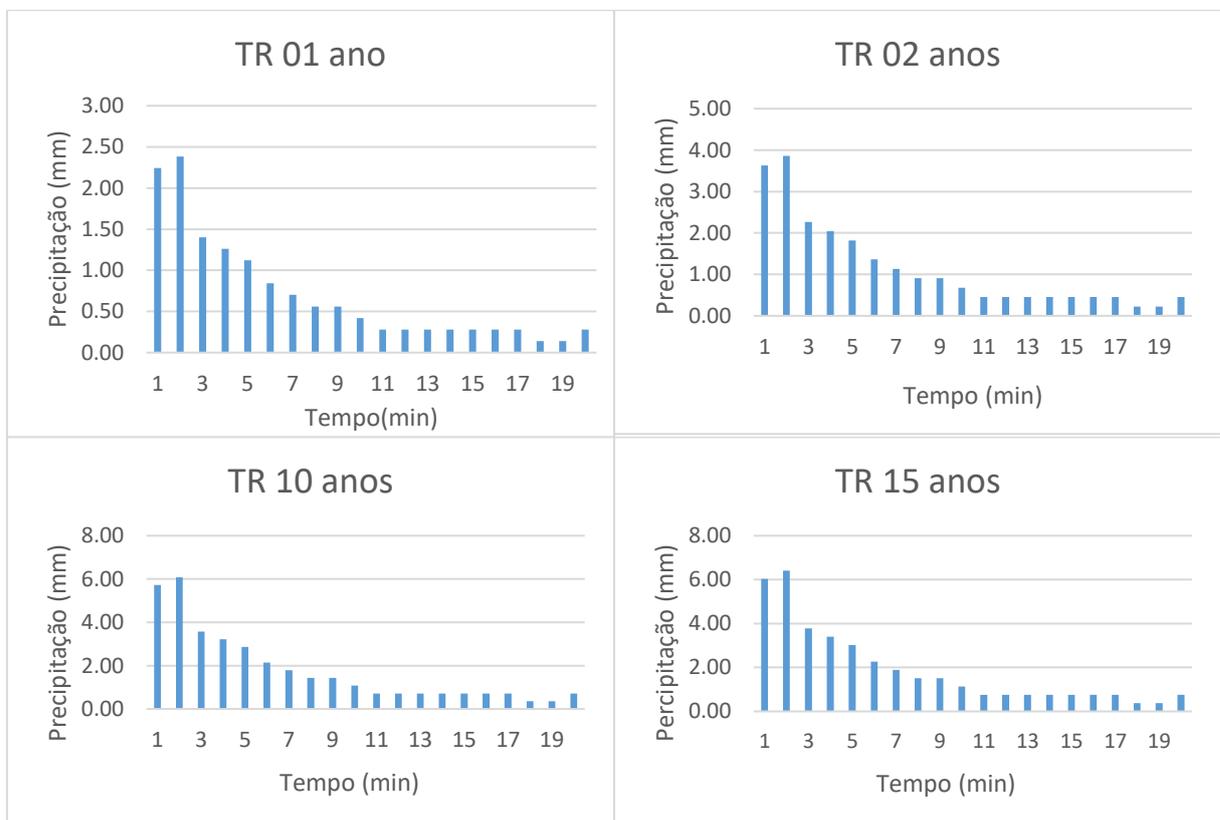


Figura 34 - Hietogramas de projeto
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.3. Modelagem SWMM

5.3.1. Construção do modelo

Inicialmente, foi necessário estabelecer a área de estudo por meio da delimitação das sub-bacias de contribuição para o sistema de drenagem, os nós, condutos e exutório. A bacia foi subdividida em 10 sub-bacias, delimitadas de acordo com a caída das ruas e o provável

sentido do fluxo da água, segundo análise da topografia da região. Dessa forma, os nós também foram planejados, segundo análise da contribuição das sub-bacias, representando os pontos de suas confluências, pontos de deságue ou pontos de notáveis alagamentos. A representação da bacia está apresentada na Figura 35. Ressalta-se que a sub-bacia 06 não contribui para a região de alagamento devido seu escoamento ser direcionado ao canal do ribeirão. Por isso, foi considerado que sua saída deverá ser o exutório.

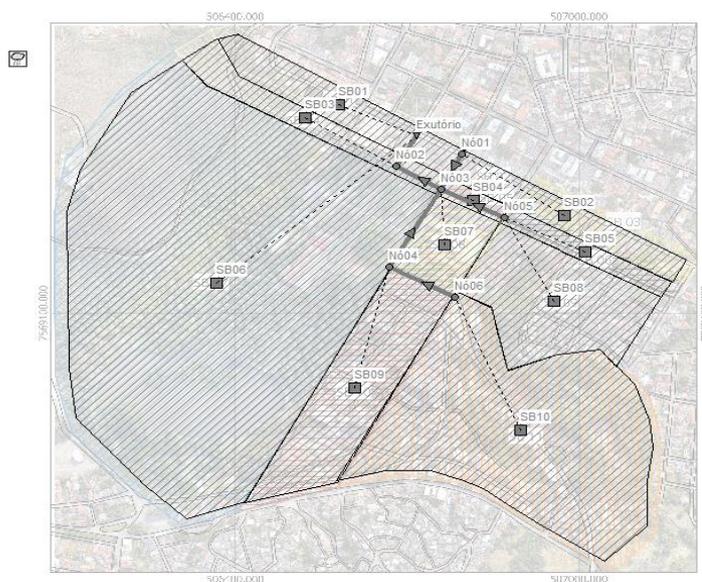


Figura 35 - Discretização de sub-bacias da BHIPA
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para a modelagem deste estudo, foram adotados condutos de seção transversal retangular a fim de caracterizar o fluxo superficial, pois a maior parcela das ruas há poucas unidades coletoras e não foi possível obter dados sobre a rede de drenagem existentes. Assim optou-se por simular um escoamento superficial com lâmina d'água máxima aceitável compatível com a altura da guia (meio-fio). A área de alagamento compreende os nós 02 (Rua João Carlos), 03 (Esquina entre R. João Carlos e Av. Camilo Soares) e 04 (Avenida Camilo Soares) como pontos críticos.

Dentre as configurações gerais de modelagem, foi adotado o método da Onda Dinâmica para a simulação de transporte hidráulico, o modelo de estimativa de infiltração Curve Number (CN-SCS) e a duração de análise de 2 horas com passo no tempo de 1 minuto.

5.3.2. Dados do modelo

A alimentação do modelo exige parâmetros específicos para cada componente do sistema. Os parâmetros necessários às sub-bacias, determinados segundo as recomendações dispostas no item 3.3.3, estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados das sub-bacias

Item	Descrição	Bacia 01	Bacia 02	Bacia 03	Bacia 04	Bacia 05	Bacia 06	Bacia 07	Bacia 08	Bacia 09	Bacia 10
Etiqueta	Rótulo definida pelo usuário	SB01	SB02	SB03	SB04	SB05	SB06	SB07	SB08	SB09	SB10
Pluviômetro	Ploviômetro associado à Bacia	PLUV									
Exutório	Nó ou outra sub-bacia que recebe a contribuição da subbacia.	EX	Nó 01	Nó 02	Nó 03	Nó 05	Nó 06	Nó 03	Nó 05	Nó 04	Nó 06
Área (ha)	Área da sub-bacia	3,20	2,61	2,45	0,47	1,10	39,57	2,21	6,39	6,28	16,24
Largura	Largura característica do escoamento superficial	79,9	60,2	54,8	37,7	33,2	354,7	75,1	130,0	116,6	274,8
Declividade (%)	Declividade média da sub-bacia	7,71%	9,58%	4,90%	4,50%	14,62%	32,50%	4,58%	15,55%	5,00%	13,00%
Impermeável (%)	Porcentagem da área superficial impermeável	55,40	87,44	40,91	87,52	81,84	12,10	72,24	55,71	65,07	35,09
n-Impermeável	Coefficiente de Manning para escoamento superficial na parcela da sub-bacia impermeável	0,016	0,016	0,016	0,016	0,029	0,016	0,016	0,016	0,029	0,016
n-Permeável	Coefficiente de Manning para escoamento superficial na parcela da sub-bacia permeável	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
PA-Impermeável (mm)	Profundidade do armazenamento em depressão na parcela impermeável da sub-bacia	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	5,00	5,00
PA-Permeável (mm)	Profundidade do armazenamento em depressão na parcela permeável da sub-bacia	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
% A imp s/ arm	Porcentagem da área impermeável sem armazenamento em depressão	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Propagação do Escoamento	Modo de propagação do escoamento superficial entre áreas permeáveis e impermeáveis	OUTLET									
% Propagada	Porcentagem do escoamento superficial propagando-se entre subáreas	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CN	Curve Number da bacia	85,60	93,41	82,40	93,18	92,04	69,44	89,10	85,49	87,65	79,83

Os parâmetros de área e declividade foram obtidos com auxílio do software Qgis. A largura foi determinada pela divisão da área da bacia pelo comprimento do maior percurso do fluxo que a água deve seguir (comprimento axial da bacia) até chegar ao ponto de saída conforme recomendações de Gironás, Roesner e Davis (2009).

O percentual de área impermeável corresponde ao somatório das classes de uso do solo de pavimentação, ocupação e solo exposto (possivelmente compactado). Os cenários que receberam a inserção de técnicas LID, a distribuição das áreas permeáveis e impermeáveis foram ajustadas considerando a nova configuração da bacia para compensar a inserção das áreas permeáveis provenientes da contribuição das LIDs.

O coeficiente de Manning para áreas permeáveis ou impermeáveis foi obtido pela ponderação dada por Rocha, Pereira e Neto (2021):

$$n_{perm/imperm} = \frac{\sum_{i=1}^{11} [\%_{perm/imperm} * A_i * n_i]}{\sum_{i=1}^{11} [\%_{perm/imperm} * A_i]} \quad (12)$$

Em que:

- $n_{perm/imperm}$: coeficiente de Manning para área impermeável ou permeável
- $\%_{imperm}$: é o percentual de área permeável/impermeável da bacia [%]
- A_i : Área da bacia [km²]
- n_i : coeficiente de Manning

Sendo os valores usuais adotados por:

- Corpo hídrico: 0,000
- Rua pavimentada por asfalto: 0,011
- Rua pavimentada por bloquetes: 0,013
- Telhado e laje: 0,015 e
- Vegetação: 0,150

A profundidade de armazenamento em depressão é dada pelos valores máximos das superfícies impenetráveis (impermeáveis) e gramados (superfícies vegetadas) segundo valores sugeridos pela ASCE no manual da USEPA para uso do SWMM (Tabela 10).

Tabela 10 - Profundidade de armazenamento em depressão

Tipo de superfície	Armazenamento
Superfícies impenetráveis	1,27 - 2,54 mm
Gramados	2,54 - 5,08 mm
Pastagem	5,08 mm

Fonte: ASCE (1992 *apud* USEPA, 2012).

O parâmetro de área impermeável sem armazenamento caracteriza o escoamento imediato que ocorre no início da precipitação antes que ocorra o armazenamento em depressão. É particularidade deste parâmetro representar o pavimento próximo a calhas sem armazenamento superficial, telhados com drenos conectados a calhas, pavimento novo que não sofre com a influência de alagamentos superficiais, entre outros (GIRONÁS; ROESNER; DAVIS, 2009). O valor recomendado desta variável é de 25%, segundo Gironás, Roesner e Davis (2009).

O *Curve Number* foi definido pela equação 13:

$$CN = \sum_{i=1}^n \frac{A_{classe\ uso\ do\ solo}}{A_{SB}} * CN_{classe\ de\ uso\ do\ solo} \quad (13)$$

Em que:

- CN: Curva número do *Soil Conservation Service-SCS* para a bacia [adim]
- A_{classe} : Área da respectiva classe (vegetação, pavimentação e solo exposto) [km²]
- A_{SB} : Área total da sub-bacia [km²]
- n: quantidade de classes de uso de solo [unid.]

Todos os parâmetros de permeabilidade (D_{Imperv;}) foram inicialmente adotados seguindo as recomendações do manual do SWMM, e posteriormente ajustados conforme calibração do modelo, com os resultados descrito no item 5.4.1.

Considerando o tipo de solo argiloso, conforme caracterização pedológica do item 4.3.3, o solo da bacia é classificado como solo Tipo C. As curvas número de cada uso do solo foram obtidas por meio dos coeficientes tabelados no manual do SWMM para condição de umidade antecedente II (Tabela 11)

Tabela 11 - CN para cada de uso do solo

Classe de uso da terra	Descrição do uso da terra	CN (Grupo hidrológico C - Argiloso)
Solo exposto	Terra	87
Vegetação rasteira	Pastagem	86
Corpo d'água	Copo d'água	100
Ocupação	Zona comercial	94
Pavimentação	Asfalto	98
Vegetação densa	Floresta normal	70

O principal parâmetro necessário ao pluviômetro é o hietograma de projeto que foi obtido em etapa anterior por meio da desagregação pelo método de Huff com passos de 1 minuto e duração de 20 minutos estimadas para os respectivos tempos de retorno 2, 10 e 15 anos (Figura 34, item 5.2 - Chuva de projeto).

Para caracterização dos condutos (C01 a C06) são requeridos os parâmetros conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros dos condutos

Item	Descrição	C01	C02	C03	C04	C05	C06
Nó de Entrada	Nome do nó de entrada do conduto	Nó 06	Nó 04	Nó 05	Nó 01	Nó 03	Nó 02
Nó de Saída	Nome do nó de saída do conduto	Nó 04	Nó 03	Nó 03	Nó 03	Nó 02	Exutório
Forma	Propriedades da forma do conduto	Retangular					
Profundidade Máxima (m)	Profundidade máxima da seção transversal do conduto	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Comprimento (m)	Comprimento do conduto	123,76	187,22	133,65	79,84	104,58	77,99
Coeficiente de Rugosidade de Manning	Coeficiente de rugosidade de Manning do conduto	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Offset de saída	Altura ou cota do conduto acima do radier do nó de jusante do conduto	0	0	0	0	0	883,55

Como os condutos foram adaptados para a configuração do escoamento superficial, o coeficiente de Manning de cada conduto foi configurado segundo características de seu respectivo material de pavimentação. A profundidade máxima do conduto foi considerada a partir da capacidade máxima de escoamento da calha da via aceitando uma lâmina d'água inferior à altura das guias evitando o transbordamento para as calçadas. Como não se espera que as vias estejam inicialmente alagadas com o início de um evento de precipitação, o fluxo inicial no conduto foi considerado nulo. Os offsets (degrau no interior do poço de visita) foram considerados como se os canais fossem conectados de forma contínua no poço de visita, apoiados diretamente sobre os solos e, portanto nulos.

Para idealização dos nós (N01 até N06) são requeridos os parâmetros conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros dos nós

Item	Descrição	Conexão 01	Conexão 02	Conexão 03	Conexão 04	Conexão 05	Conexão 06
Nome	Nomenclatura definida pelo usuário	N01	N02	N03	N04	N05	N06
Etiqueta	Rótulo opcional que identifique a conexão	N01	N02	N03	N04	N05	N06
Cota do radier (m)	Cota do radier da conexão	885,9	883,3	883,5	883,36	890,1	887,6
Profundidade máx. (m)	Profundidade máxima da conexão (medida do terreno até o radier)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Área de Alagamento (m ²)	Área com água alagada sobre a conexão depois de ocorrer uma inundação	0	1848	1923	3386	0	0

As áreas de alagamentos dos nós foram obtidas com auxílio do software de geoprocessamento QGIS, considerando a extensão da área provável de alagamento no entorno do nó. Para isso, a partir de análise de registros de imagem e vídeos de eventos de alagamentos na bacia foi possível delimitar a área total de alagamento da bacia e posteriormente determinar a subdivisão das áreas alagadas em cada nó. As cotas dos radiers foram obtidas de acordo com o perfil topográfico das avenidas gerados a partir do MDE da bacia.

Escolhendo aproveitar bem os espaços disponíveis, as áreas disponíveis foram avaliadas segundo os critérios de tamanho de área, declividade, trafegabilidade, distância de áreas de captação de água para consumo, inexistência de interferência em outros sistemas como a infraestrutura da pavimentação e lençol freático (Quadro 7).

Quadro 7 - Aptidões e restrições das áreas disponíveis na bacia e LIDs adotadas para cada local

Áreas disponíveis	Aptidões	Restrições	LID aplicável				
			TI	PP	JC	PI	TV
Calçada	- Baixa declividade - Ampla área de contribuição - Local amplo, reservado para circulação e lazer que favorece a ambientação e paisagismo com áreas verdes	- Para a escala de 1:650000 o solo é considerado argiloso, necessário a análise do solo local		X	X		
Praça Hélio Castilho Moreira	Extensa área de contribuição	- Para a escala de 1:650000 o solo é considerado argiloso, necessário a análise do solo local - Exige-se modificações na camada superficial do pavimento para condução do fluxo até o poço central - Área de contribuição com baixa carga de sedimentos				X	
R. Benjamin Constant e R. Comendador Pereira	- Baixo tráfego - Baixa declividade	Ruas mais estreitas		X			
Áreas verdes	Baixa declividade	Áreas privadas	X				
Imóveis particulares	Alta densidade de imóveis com áreas de telhado grandes	- Áreas privadas - Necessidade de capacidade de suporte da estrutura - Depende da aceitação do proprietário					X
Calçadas	- Algumas ruas possuem calçadas mais largas	- Larguras estreitas - Calçadas situadas na av. Camilo Soares estão próximas de locais de captação de água (zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático) - Possibilidade de contaminação do lençol freático - Algumas ruas possuem declividade superior a 5%	Sem adição de LID				
Sarjetas	- Ruas ao norte da bacia com largura ampla - As sarjetas são medidas que já recebem o fluxo da água	- Algumas ruas são estreitas, o uso das sarjetas largas poderia restringir o espaço carroçável - Algumas ruas possuem declividade superior a 5%	Sem adição de LID				

*TI -Trincheira de infiltração; PP-Pav. Permeável; JC-Jardim de chuva; PI-Poço impermeável; TV – Telhado verde.

A partir da delimitação dos critérios, aptidões e restrições das áreas disponíveis foram adotadas cinco técnicas LID (Figura 36). As técnicas LID selecionadas são medidas de infiltração sem adição de drenos de fundo. Observando as recomendações do Quadro 2 para evitar os efeitos de um sistema mal infiltrado que possa gerar problemas sanitários nas estruturas e, considerando que não foi possível obter os parâmetros de infiltração em campo, foi adotado neste estudo o solo argiloso predominante da bacia, com condutividade hidráulica de 10^{-5} m/s. Além disso, as técnicas foram inseridas em locais que garantem um distanciamento de possível presença de lençol freático raso.

Foram simulados um jardim de chuva ou um pavimento permeável a serem instalados na área demarcada por um retângulo que corresponde a uma área de lazer (calçadão) localizado na sub-bacia 01. Esta estrutura receberá a vazão da montante da bacia 02, que deverá ser direcionado até a estrutura antes que alcance o ponto de alagamento (Nó 03). Os jardins de chuva têm aptidão para receber a contribuição de áreas de até 10.000m² e devido ao tráfego exclusivo para pedestres, este ponto é um local apto para a inserção de pavimentos permeáveis.

Na praça Hélio Castilho Moreira (demarcada por um círculo) será simulada a implantação de um poço de infiltração (PI). Embora o PI tenha melhor eficiência em solos arenosos ou siltosos, há a possibilidade de inserção de drenos para lançamento posterior no sistema de drenagem. O solo identificado na região tem predominância de solo com textura média/argilosa, contudo essa informação foi obtida via escala de mapa pouco precisa, portanto seria necessário a determinação do solo local. O PI proposto terá dimensões retangulares de uma trincheira equivalente à área circular para atender ao espaço disponível. Embora o modelo SWMM não permita a inserção de poços de infiltração, a estrutura de um poço é similar à estrutura de uma trincheira, sendo necessárias camadas superficiais e de armazenamento preenchida com material granular. Dessa forma, esse estudo optará por simular um poço com as configurações de uma trincheira. Esta estrutura receberá parcela da vazão da bacia 10 e demandará adaptação para o direcionamento do fluxo até a estrutura (alteração do abaulamento da rua que conduz as águas pluviais para as laterais até as sarjetas. Considerando que o poço está centralizado, seria necessário alterar o caminho de fluxo da água para que consiga desaguar no poço).

Na área verde da sub-bacia 10 próximo às residências será simulada a inserção de uma trincheira de infiltração que deverá aliviar a descarga dos telhados dos imóveis próximos à trincheira, que atualmente são lançados direto na rua. As trincheiras de infiltração são técnicas

que podem ser aplicadas em espaços estreitos demandando menor área linear podendo ocupar corredores entre lotes.

O pavimento permeável também locado na sub-bacia 10 sendo simulado nas ruas pertencentes a uma área residencial que possuem baixo tráfego de veículos (arruamentos com linha tracejadas).

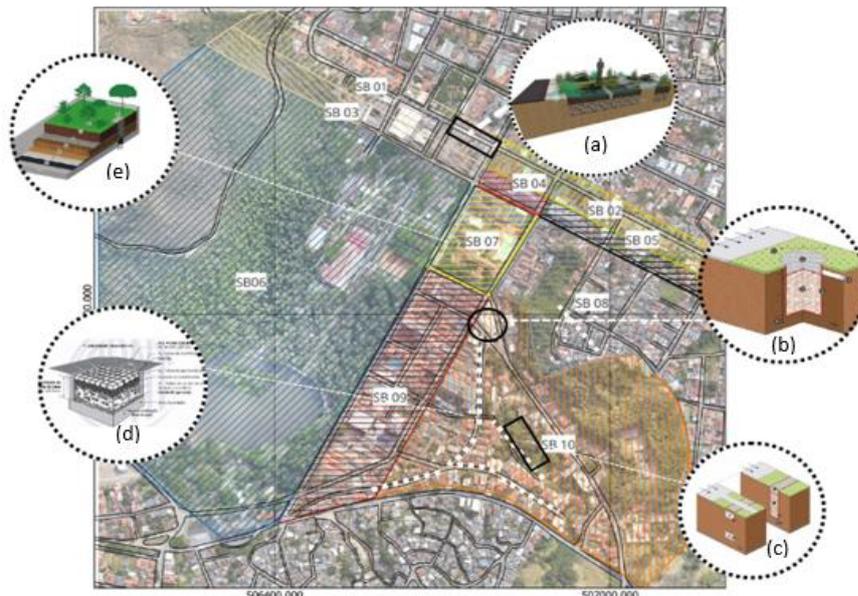


Figura 36 – Técnicas LID selecionadas para simulação da bacia

Por fim, devido à alta densidade de imóveis com grandes áreas de telhado, serão simulados telhados verdes na proporção estabelecida para cada cenário de estudo, considerando apenas as edificações com área de telhados superiores a 100 m² (Figura 37).

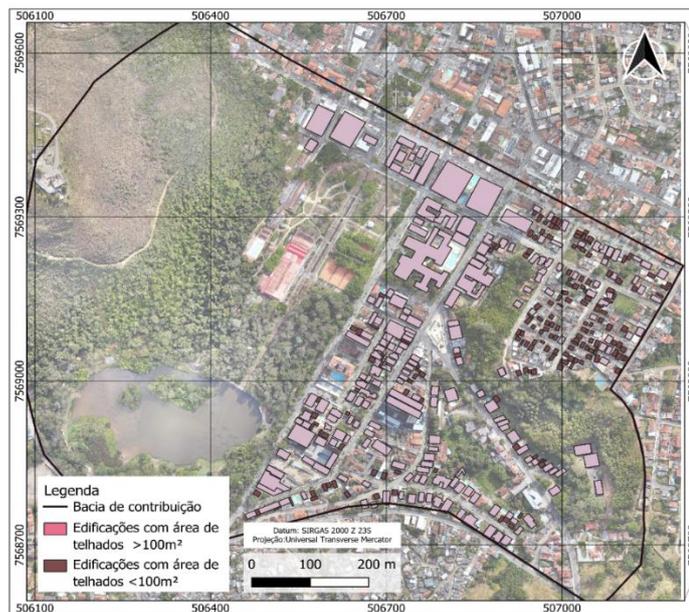


Figura 37 – Edificações com telhados selecionados para a inserção de telhados verdes

Embora disponíveis, a quantidade de calçadas com área para inserção de LID sem comprometer o trânsito de pedestres é baixa, a maioria das calçadas são estreitas ou possuem declividades superiores a 5%, portanto não foram inseridos LID nesses espaços. Já as sarjetas, poderiam receber trincheiras de infiltração, no entanto, tendo em vista que as trincheiras possuem profundidades menores, há possibilidade de infiltração nas camadas dos pavimentos adjacentes, contudo, como não há ainda soluções para que as medidas de infiltração aplicadas não comprometam a estrutura da pavimentação, não serão consideradas a instalação dessas técnicas.

Em relação aos processos do ciclo hidrológico, os módulos LID no SWMM trabalham com duas modalidades de áreas para a estimativa da infiltração e escoamento - áreas permeáveis e impermeáveis. Para a simulação, o modelo exige que seja expresso o percentual de tratamento dedicado a cada uma das técnicas LID, que neste estudo correspondem às áreas apresentadas na Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 14 – Levantamento de área permeável tratada pelos telhados verdes

Sub-bacia	Área total	Área imp. bacia (km ²)	Área perm. Bacia (km ²)	Área Total permeável	% permeável tratada	
					CEN 01	CEN02
SB01	640,21	0,018	0,014	0,015	2,15%	4,30%
SB02	3.732,14	0,023	0,003	0,007	26,62%	53,25%
SB03	3.091,92	0,010	0,014	0,018	8,81%	17,61%
SB04	1.830,00	0,004	0,001	0,002	37,86%	75,71%
SB05	9.509,46	0,009	0,002	0,012	41,30%	82,60%
SB06	145,88	0,048	0,348	0,348	0,02%	0,04%
SB07	413,85	0,016	0,006	0,007	3,16%	6,33%
SB08	13.810,22	0,036	0,028	0,042	16,41%	32,81%
SB09	15.365,40	0,041	0,022	0,037	20,59%	41,17%
SB10	16.105,74	0,057	0,105	0,122	6,63%	13,26%

Tabela 15 –Área permeável e impermeável de contribuição da LID

Sub-bacia	Técnica		Área contribuição CEN01(m ²)		Área contribuição CEN02(m ²)		Área bacia (km ²)	
	CEN 01	CEN 02	Imperm.	Perm.	Imperm	Perm	Imperm	Perm
	SB02	JC*	PP*	3600	400	3110	700	0,023
		PP	9.432,74	4819,85	9.432,74	4.819,85		
SB10	PP	TI*	-	-	1.610,57	8000	0,057	0,122
		PI*	-	-	3600	19,63		

*PP:JC- Jardim de chuva; PP-Pavimento permeável; TI-Trincheira de Infiltração PI- Poço de infiltração

Tabela 16 – Área permeável e impermeável tratadas pelas demais LID

Sub-bacia	Técnica		CEN 01		CEN02	
	CEN 01	CEN 02	Taxa imperme.	Taxa perm.	Taxa Imperm.	Taxa perm.
SB02	JC*	PP*	15,78%	5,71%	13,63%	9,99%
		PP	16,55%	3,97%	7,76%	3,97%
SB10	PP	TI*	-	-	2,83%	6,58%
		PI*	-	-	6,32%	0,02%

*PP:JC-Jardim de chuva; PP-Pavimento permeável;
TI-Trincheira de Infiltração PI- Poço de infiltração

Os parâmetros adotados para as técnicas LID, apresentados na Tabela 17, seguiram as recomendações especificadas no item 3.3.3.

Tabela 17 - Parâmetros das técnicas LID empregadas

Camada de processo	Parâmetro	Tipo de LID				
		Pavimento permeável	Trincheira de infiltração	Poço de infiltração	Telhado verde	Jardim de Chuva
Superfície	Altura da berma (mm)	0,8	150	0	200	150
	Fração da cobertura vegetal (%)	N.A.*	N.A.	N.A.	0,2	0,2
	Coefficiente de Manning (adim)	0,016	N.A.	N.A.	0,15	0,15
	Declividade da superfície (%)	1	1	1	1	1
Pavimento	Espessura (mm)	100	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Índice de vazios	0,15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Fração da superfície impermeável (%)	0	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Permeabilidade (mm/h)	3600	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Fator de colmatção (adim.)		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Intervalo de regeneração (dias)	7	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Fração de regeneração		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Solo	Espessura (mm)	25	N.A.	N.A.	150	380
	Porosidade (%)	0,437	N.A.	N.A.	0,45	0,45
	Capacidade de campo	0,378	N.A.	N.A.	0,378	0,378
	Ponto de murcha	0,265	N.A.	N.A.	0,265	0,265
	Condutividade hidráulica (mm/h)	0,360	N.A.	N.A.	0,360	0,360
	Declividade de condutividade(%)	10	N.A.	N.A.	10	10
	Potencial matricial (mm)	320,04	N.A.	N.A.	320,04	320,04
Armazenamento	Espessura (mm)	357,8	1550	6900	70	N.A.
	Índice de vazios	0,35	0,30	0,3	0,25	N.A.
	Taxa de filtração (mm/h)	450	450	450	N.A.	N.A.
	Fator de colmatção (adim.)	0	0	0	0	N.A.

*NA – Não se aplica

5.4. Simulações

Em simulações hidrodinâmicas deve-se procurar estabelecer o pior cenário de modo que um projeto seja dimensionado para suportar a pior situação esperada de um evento. Nessas condições, o tempo de duração da chuva nem sempre deve ser adotado como o tempo de concentração da bacia, sendo mais adequado determinar a duração da chuva que consegue provocar o cenário mais crítico (INNOCENTE et.al., 2018). Para obter a duração crítica, foram simuladas as chuvas de projeto até três vezes a referência do tempo de concentração obtidas na etapa anterior e duas horas de simulação. Como resultado, observou-se que com a duração de 20 minutos eram alcançados, em todos os tempos de retorno, os picos máximos de vazão (Tabela 18) e, portanto, será adotada como a duração da chuva de simulação.

Tabela 18 - Resultados da simulação da duração crítica

Duração (min)	TR 02 anos		TR 10 anos		TR 15 anos	
	P(mm)	Vazão (m ³ /s)	P(mm)	Vazão (m ³ /s)	P(mm)	Vazão (m ³ /s)
15	18,85	4,08	29,62	8,12	31,23	8,75
20	22,69	5,46	35,75	10,54	37,72	11,32
30	28,11	4,56	44,40	8,33	46,86	8,97
45	33,52	4,24	53,05	8,05	56,01	8,64

As chuvas críticas discretizadas temporalmente e aplicadas nas simulações constam na Figura 34 (item 5.2 - Chuva de projeto).

5.4.1. Cenário 00 (atual)

O cenário zero é o cenário referência que considera as configurações de uso e ocupação do solo e as rugosidades atuais das superfícies da bacia. A partir dessas configurações, o cenário deve ser simulado de modo a alcançar o resultado dos eventos de alagamentos recorrentes, o que inclui buscar uma lâmina semelhante à lâmina observada em pontos de controle. Para alcançar esse objetivo, são realizados ajustes nos parâmetros, normalmente por meio do ajuste do *Curve Number (CN)*, alterando o parâmetro proporcionalmente até atingir o valor desejado.

Os eventos de alagamento naquela área do município são eventos com ocorrência de pelo menos uma vez ao ano atingindo sempre a mesma lâmina d'água observável ao ponto de controle nó 04 (Figura 25 - Evento de chuva em dezembro/21 e Figura 26 - Evento de chuva em dezembro/15). Considerando essa observação e, avaliando que as simulações para chuvas com TR de 02 anos geravam resultados bem superiores ao observável, optou-se por calibrar o cenário zero com a chuva correspondente ao TR de 1 ano. Para a calibração, foi analisada a

evolução da lâmina de alagamento gerada no nó variando o parâmetro Curve Number de 5 a 20%, porém não foi observado alterações significativas nos resultados. Obteve-se sucesso com a calibração a partir das alterações do coeficiente de rugosidade (antes considerados para asfaltos lisos e posteriormente como asfalto rugoso); alteração da taxa de área impermeável sem armazenamento em depressão (o manual do SWMM recomenda o valor de 25%, foi ajustado para 20% na calibração) e, alteração da profundidade de armazenamento em depressão nas áreas impermeáveis (o SWMM recomenda usar o valor de 2,54mm, na calibração foi necessário aumenta-lo em 1mm).

Após a calibração, o cenário zero foi simulado para as chuvas correspondentes aos tempos de retorno mais empregados nos projetos de microdrenagem urbana (2, 10 e 15 anos). Como resultado obtém-se os valores das lâminas de alagamento acumuladas (Figura 38) em cada nó variando entre 0,26 m a 0,86 m para as simulações dos volumes de chuva o associados ao TR no nó mais crítico (Nó 04).

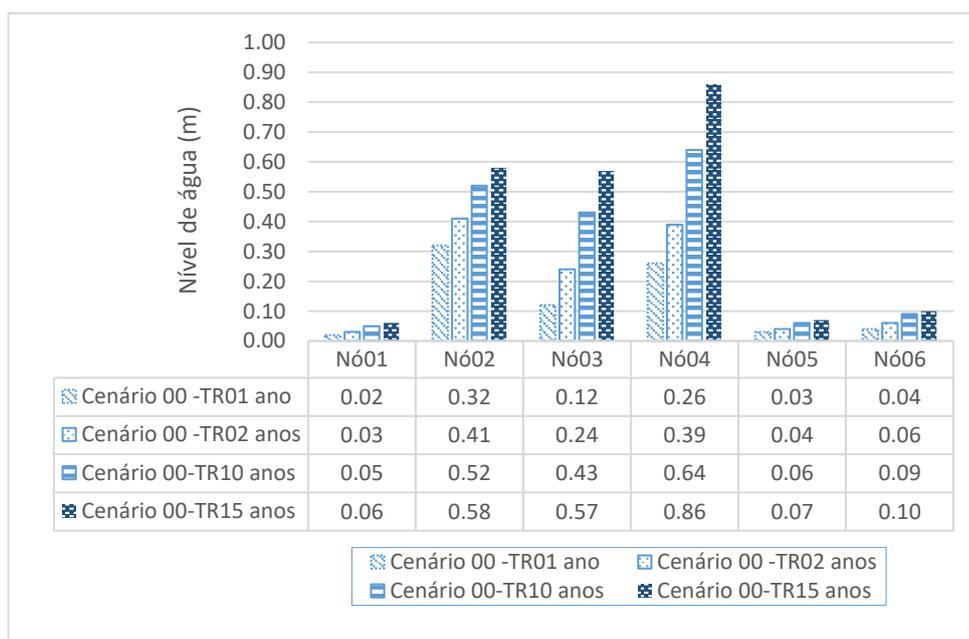


Figura 38 – Lâminas de água encontradas no cenário 00
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Adicionalmente, a vazão esperada para o cenário simulado com o tempo de retorno 01 ano, deve alcançar um pico de 2,47m³/s (Figura 39).

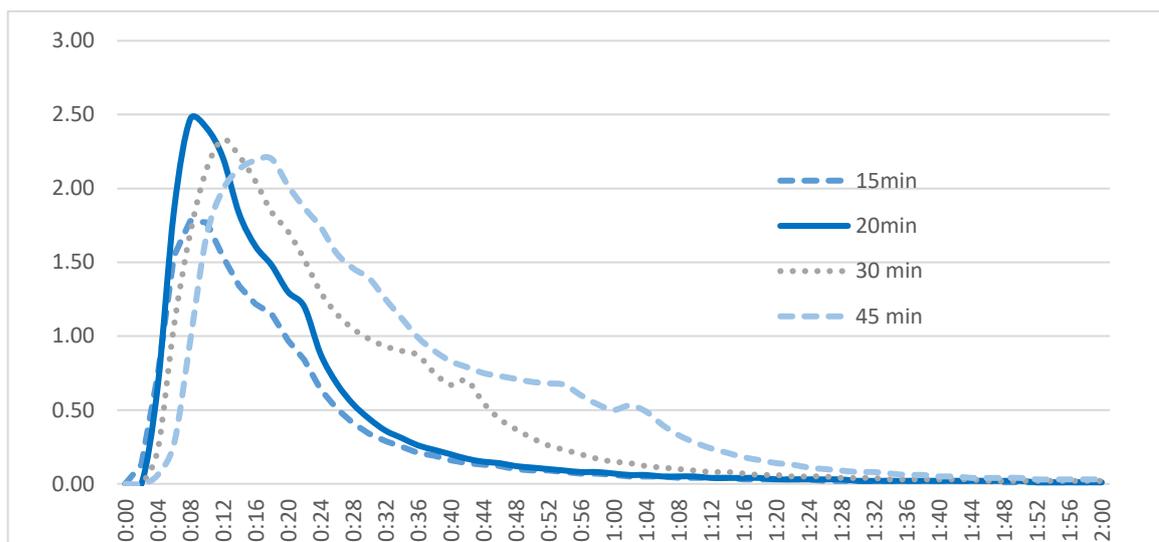


Figura 39 – Hidrogramas obtidos para as diferentes durações de chuva
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Em função da extensa área permeável da sub-bacia 06 (87,90%), esta bacia é a que mais contribui para a infiltração da água precipitada refletindo no menor índice de escoamento total de todas as sub-bacias.

Nos gráficos bloxplot das Figura 40 e Figura 41 são apresentadas as variações dos parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias nos diferentes tempos de retorno. Pela análise do bloxplot das lâminas de infiltração estimadas, nota-se que para o tempo de retorno de 15 anos há uma tendência de manutenção da mediana do volume infiltrado notado no TR de 10 anos, sendo este resultado associado à resposta de cada sub-bacia para o evento crítico. Essa resposta de infiltração foi determinada pela capacidade de infiltração atual das bacias considerando a taxa constante de áreas permeáveis obtidas pelo uso e ocupação do solo e o tipo de solo conforme aplicado no método SCS. Essa estimativa reforça que o percentual de áreas de infiltração existente seria capaz de atender um volume de infiltração para eventos com recorrência de até 10 anos, reduzindo a partir deste período a saturação do solo se mantidas as condições atuais de infiltração e armazenamento da bacia. Esse fato também é notável ao analisar a variação da amplitude relativa das medianas entre os tempos de retorno. À medida que há um aumento do TR a diferença absoluta da mediana de infiltração reduz.

É verificado também que o aumento da intensidade da chuva resultou na variabilidade (amplitude interquartílica) entre os volumes de infiltração individuais estimados. Isso é resultado das diferentes características de cada bacia, como a declividade e a taxa de área permeável que influenciam de forma individual seus processos de infiltração. Sobre a declividade, é certo que as altas taxas de declividades não favorecem a entrada da água no solo

devido à velocidade de escoamento atingida pelo fluxo de água. Além disso, esse parâmetro é um fator que pouco influencia a variação da infiltração para baixas intensidades, o que pode ser notado na baixa variabilidade do volume infiltrado nas bacias para evento de recorrência de 01 ano. Já a taxa de áreas permeáveis vai incidir no maior índice infiltrado à medida que a bacia é menos impermeável. Demais parâmetros como o tipo e a saturação do solo, embora considerados como homogêneos para toda a bacia neste estudo, também influenciam a capacidade de infiltração. Uma vez que o solo já está saturado, a capacidade de armazenamento é reduzida e não favorece a infiltração, ao contrário do que acontece com solos mais porosos e não saturados.

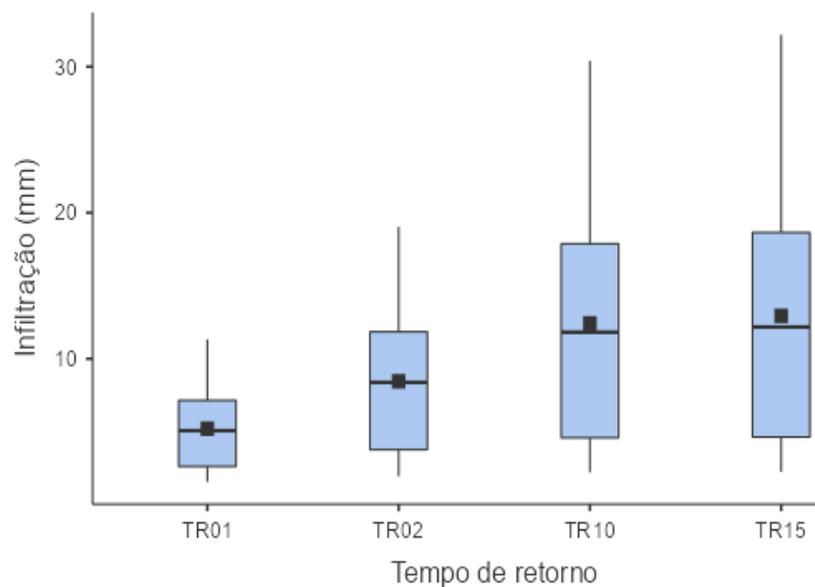


Figura 40 - Boxplot para diferentes tempos de retorno considerando a infiltração

O escoamento total que inclui o somatório do escoamento das áreas permeáveis e impermeáveis da bacia é impactado com o aumento da intensidade. O bloxplot da Figura 41 indica um aumento no escoamento total à medida que aumenta a intensidade da chuva e é mantida a capacidade constante de infiltração das sub-bacias. Há pouca variabilidade no escoamento para TR de 01 ano que possui menor volume de chuva.

O volume de armazenamento foi considerado como as lâminas armazenadas em depressões. Há uma tendência constante do armazenamento entre os TR de 01 a 02 anos e redução para recorrência de 10 e 15 anos. A leve redução do armazenamento para TR de 15 anos se deve às diferentes características das sub-bacias. Além das proporções de áreas com armazenamento em depressão, foram considerados para cada sub-bacia diferentes proporções

para profundidade das lâminas de armazenamento em depressões na calibração do modelo. As sub-bacias 09 (área ~ 6 ha) e 10 (área ~16 ha) foram calibradas com as maiores lâminas de armazenamento. Devido a maior área da sub-bacia 10 em relação às demais, essa sub-bacia tem capacidade para maior armazenamento em função de sua proporção de áreas em depressão. Além disso, a formação e acomodação da lâmina nas depressões são influenciadas pela intensidade da chuva, sendo mais dificultado o processo de formação de poças em intensidades mais altas.

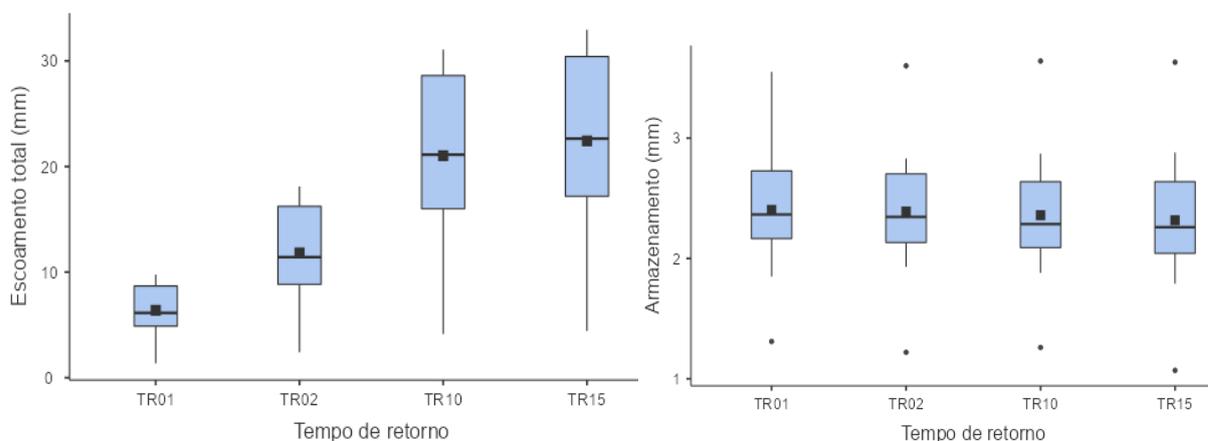


Figura 41 - Boxplot para diferentes tempos de retorno considerando o escoamento total e armazenamento

A bacia que mais contribui para o escoamento foi a sub-bacia 04 que possui alta taxa de ocupação e a menor taxa de área permeável dentre todas as sub-bacias, equivalente a apenas 12,47%. A partir dessa análise, pode-se ter um indicativo de áreas prioritárias para inserção de técnicas LID. Embora ainda seja necessário avaliar a disponibilidade de áreas para locação, é interessante priorizar as bacias com maior geração de escoamento superficial.

A sub-bacia 08 está entre as bacias com maior taxa de permeabilidade e contribui pouco para o escoamento em relação às demais sub-bacias. Destaca-se que a bacia 08 é mais permeável que a bacia 09 e portanto tem escoamento inferior, porém sua vazão de pico é superior à vazão de pico da sub-bacia 09, isso está associado à alta declividade da sub-bacia 08 (Tabela 19) que influencia a velocidade de escoamento, reduzindo o tempo de concentração e a capacidade de infiltração.

Tabela 19 - Escoamento superficial por sub-bacia no cenário atual para chuva crítica

Sub-bacia	Área bacia (m ²) x1000	TR 01 ANO		TR 02 ANOS		TR 10 ANOS		TR 15 ANOS	
		Volume		Volume		Volume		Volume	
		Escoamento Total (m ³)	Vazão pico (L/s)						
SB01	32	195,84	180,00	354,56	390,00	650,56	760,00	697,60	820,00
SB02	26	248,82	200,00	462,54	430,00	797,94	850,00	846,30	920,00
SB03	24	108,48	100,00	194,40	220,00	351,60	430,00	378,00	470,00
SB04	5	48,85	50,00	90,55	110,00	155,40	210,00	164,75	220,00
SB05	11	98,23	80,00	184,47	170,00	323,51	340,00	343,64	360,00
SB06	396	538,56	740,00	954,36	1.460,00	1.639,44	2.670,00	1.754,28	2.870,00
SB07	22	174,68	150,00	321,20	330,00	576,62	640,00	614,68	690,00
SB08	64	394,88	400,00	711,68	850,00	1.283,84	1.610,00	1.375,36	1.720,00
SB09	63	376,11	180,00	738,99	450,00	1.380,96	960,00	1.479,87	1.050,00
SB10	162	563,76	540,00	1.061,10	1.250,00	1.903,50	2.490,00	2.041,20	2.670,00

5.4.2.Cenário 01

Com as configurações pré-estabelecidas do cenário anterior, foram inseridas as técnicas LID previstas para o cenário 01. Esse cenário prevê a otimização do espaço com a inserção de jardim de chuva na bacia 02 e redirecionamento da vazão gerada nessa bacia para o jardim; inserção de pavimento permeável na bacia 10 e o emprego de telhados verdes em 50% dos telhados de todas as sub-bacias. Na Tabela 20 são apresentados os percentuais equivalentes às áreas de inserção das técnicas em cada sub-bacia. Neste cenário, as técnicas LID compreendem a parcela de 5,3% da área da área de estudo.

Tabela 20 - Distribuição das técnicas LID em cada bacia no cenário 01

Sub-bacia	LID implantada	Percentual equivalente da LID implantada (%)
01	Telhado verde	6,87
02	Telhado verde + Jardim de chuva	11,49
03	Telhado verde	8,16
04	Telhado verde	21,30
05	Telhado verde	9,09
06	Telhado verde	0,05
07	Telhado verde	20,80
08	Telhado verde	10,00
09	Telhado verde	13,00
10	Telhado verde + Pavimento permeável	8,77

As simulações realizadas com a chuva de duração de 20 minutos, para o cenário 01, resultaram vazões estimadas em 2,11m³/s para TR de 01 ano; 4,58 m³/s para TR de 02 anos;

8,43 m³/s para TR de 10 anos e 9,02 m³/s para TR de 15 anos. As técnicas implantadas auxiliaram na redução da ordem de 14,57% da vazão para TR de 01 ano; redução de 16,12% para TR de 2 anos; 20,02% para TR de 10 anos e 20,32% para TR de 15 anos em relação ao cenário sem inserção de técnicas LID (Figura 42).

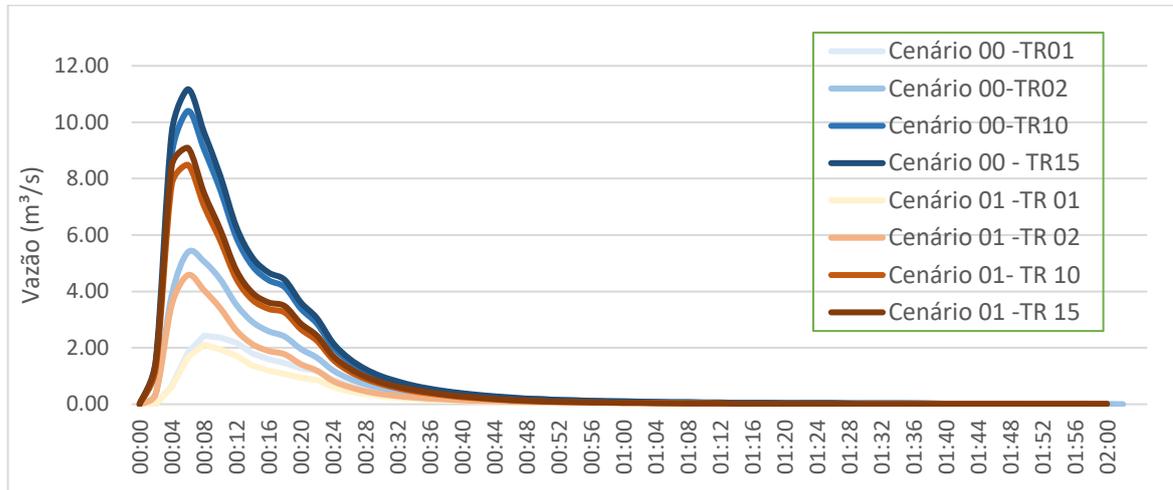


Figura 42 - Escoamento na bacia no cenário 00 e cenário 01
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No gráfico da Figura 43 são apresentados os níveis das lâminas d'água em cada nó do sistema simulado. Os nós 02, 03 e 04 são os nós críticos onde sempre ocorrem alagamentos.

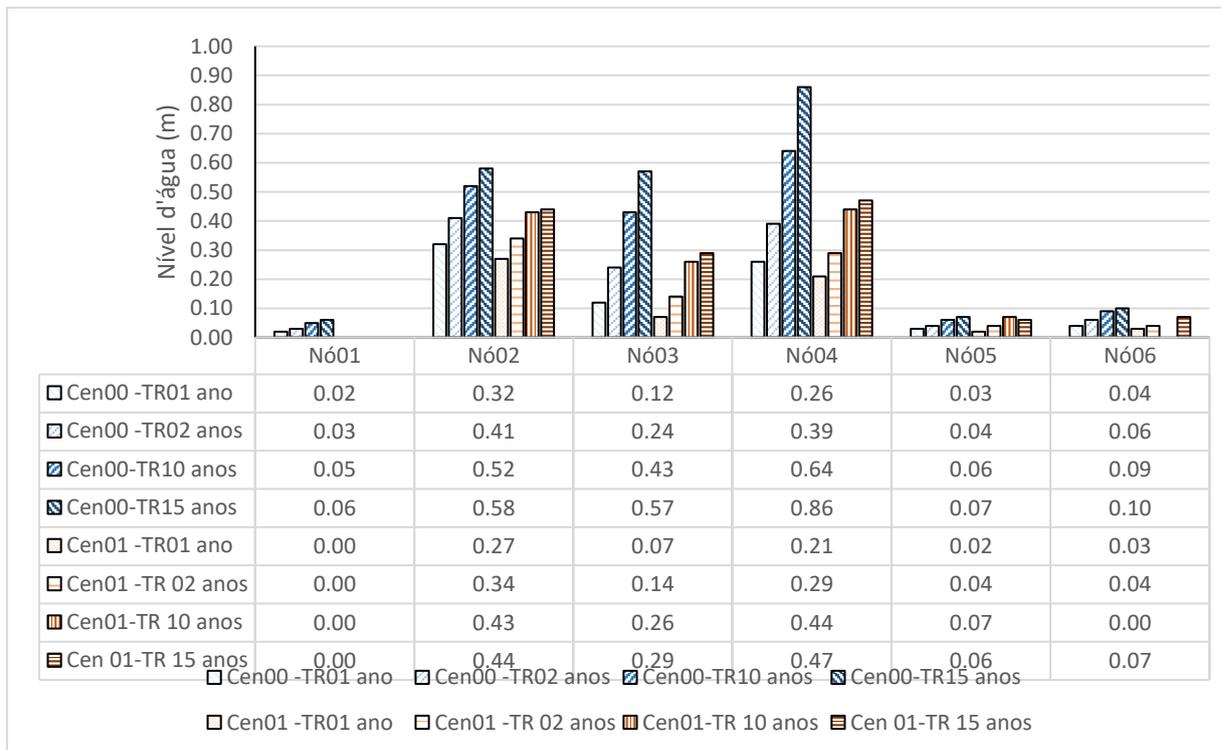


Figura 43 - Comparação das lâminas d'água nos Cenários 00 e 01
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A modificação na configuração da bacia pelo cenário 01 foi capaz de reduzir toda a lâmina gerada no nó 01. A alteração nas configurações da bacia reduziu as lâminas de água na faixa absoluta de 1 a 39 cm para as chuvas dos diferentes tempos de retorno analisados.

Para as lâminas do nó 05 e nó 06 as variações foram pouco expressivas. Ambos os nós não são nós de planície, o que facilita o escoamento da chuva e quando formam lâminas acumuladas, essas possuem baixa magnitude.

O nó 04 apresenta as maiores lâminas de água devido a maior área de contribuição recebida pelo deságue das bacias 09 e 10. Além da extensa área de drenagem em conjunto dessas duas bacias, a bacia 09 é bem impermeabilizada (52,07%). O volume notado no nó 03 é resultado do lançamento da água das bacias 02 e 03, principalmente pelo fluxo proveniente do bairro Observatório que possui acentuada declividade acelerando o escoamento até a planície. Embora observado neste nó uma lâmina inferior às demais (que estão na planície), isso se dá pela cota altimétrica do nó que está 5 cm mais alta que às demais da planície.

Nos gráficos bloxplot da Figura 44 são apresentadas as variações dos parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias nos diferentes tempos de retorno do cenário 01. Pela análise do bloxplot das lâminas de infiltração estimadas nas sub-bacias, nota-se que há uma tendência de aumento da capacidade de infiltração nas sub-bacias com o aumento do tempo de retorno. Comparando ao cenário zero, a inserção de 5% de LID na bacia possibilitou o aumento da capacidade de infiltração com alcance semelhante ao cenário sem medidas LID no que diz respeito ao tempo de retorno, limitando a infiltração ao TR de 10 anos, a partir do qual se torna constante. Assim como no cenário zero, a partir do tempo de retorno de 15 anos houve uma tendência de manutenção da mediana do volume infiltrado, resultado da saturação da técnica LID após esse tempo de recorrência. Isso reforça a conclusão de que a capacidade das LID implantadas, são dadas em função de sua escala aplicável nas bacias e do volume de armazenamento dimensionado em projetos. O escoamento e o armazenamento apresentaram tendência constante para todos os tempos de retorno.

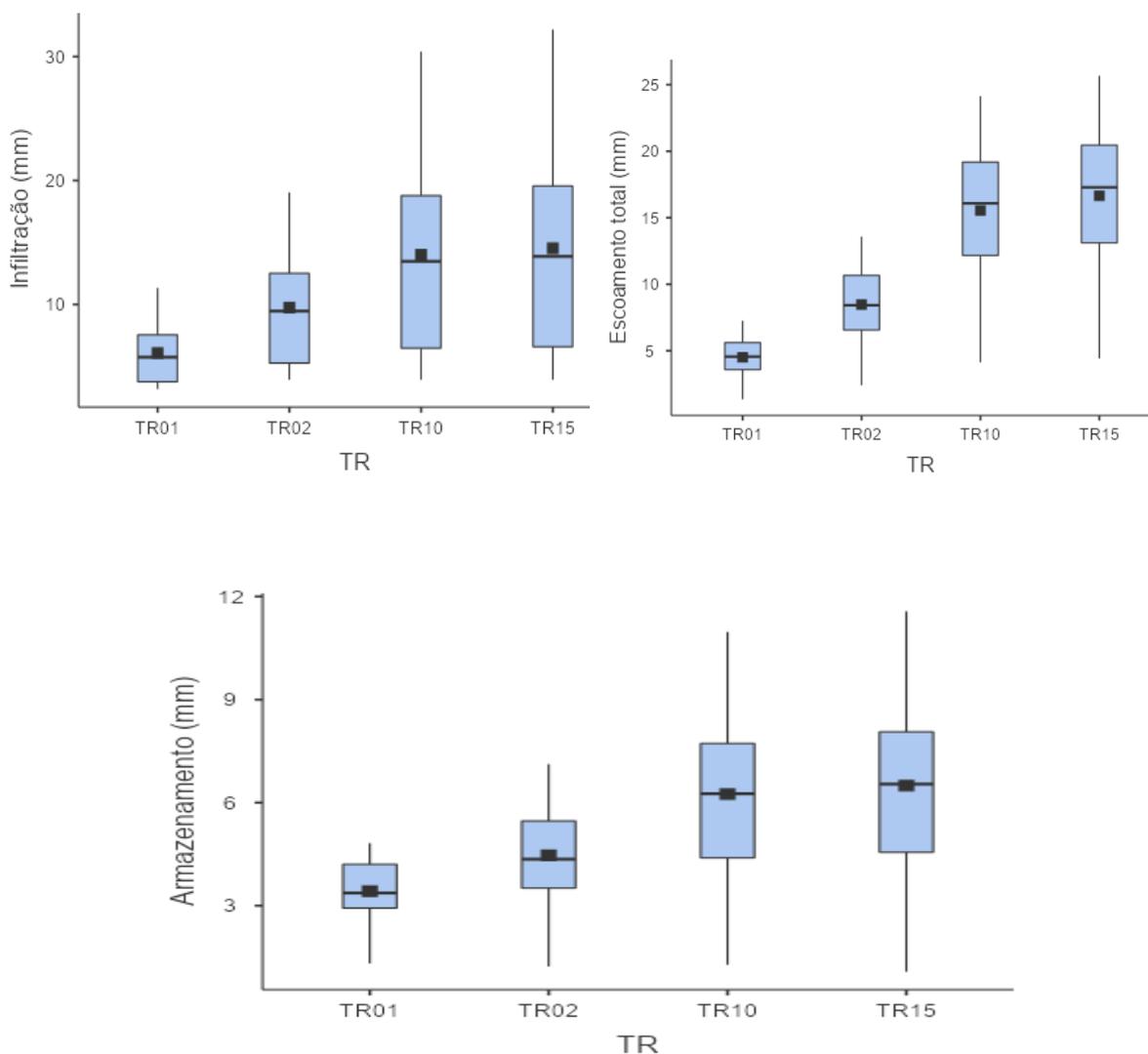


Figura 44 - Bloxplot para os parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias em diferentes tempos de retorno no cenário 01

Para a situação que replica os resultados observados nos eventos que acontecem no local (chuva com TR01 ano e duração 20 minutos), observa-se que as alterações propostas pelo cenário 01 estimam um aumento na infiltração das sub-bacias que superam em mais de 100% a infiltração do cenário zero nas sub-bacias 02 e 04 (Tabela 21). A sub-bacia 06 é a área com maior parcela permeável e apresenta poucas edificações, portanto obteve pouca alteração em termos de inserção de LID (6,87%) obtendo baixo êxito na redução do volume escoado e nenhum aumento no volume infiltrado.

O escoamento gerado na área de estudo sofreu redução com variações alcançando a redução máxima na sub-bacia 07 (42,9%), principal sub-bacia que contribuiu para uma maior redução da lâmina d'água no nó 03. O nó 04, que também é um nó crítico, recebeu neste cenário

a maior redução de lâmina d'água acumulada, isso foi resultado das maiores reduções conjuntas observadas nas sub-bacias por ele alimentadas (SB09 e SB10).

Tabela 21 - Infiltração e escoamento gerado para chuva crítica com TR 01 ano (cenário 01)

Sub-bacia	Infiltração Cenário 00 (mm)	Infiltração Cenário 01 (mm)	Aumento da Infiltração (%)	Escoamento Cenário 00 (mm)	Escoamento Cenário 01 (mm)	Redução do escoamento (%)
SB01	5,70	6,12	7,4%	6,12	5,01	18,1%
SB02	1,59	3,37	111,9%	9,57	6,89	28,0%
SB03	7,63	7,97	4,5%	4,52	3,34	26,1%
SB04	1,57	3,37	114,6%	9,77	5,81	40,5%
SB05	2,32	3,16	36,2%	8,93	7,26	18,7%
SB06	11,33	11,33	0,0%	1,36	1,35	0,7%
SB07	3,53	4,90	38,8%	7,94	4,53	42,9%
SB08	5,67	6,26	10,4%	6,17	4,58	25,8%
SB09	4,48	5,35	19,4%	5,97	4,29	28,1%
SB10	8,32	8,89	6,9%	3,48	2,00	42,5%

5.4.3. Cenário 02

O cenário 02 busca otimizar o espaço associando às técnicas do cenário 01 com alterações para o emprego de pavimentação permeável, a instalação de trincheira e poço de infiltração, e o emprego de telhados verdes em 100% dos telhados de todas as bacias. Na Tabela 22 são apresentados os percentuais equivalentes às áreas de inserção das técnicas em cada sub-bacia. Neste cenário, as técnicas LID compreendem a parcela de 9,27% da área da área de estudo.

Tabela 22 - Distribuição das técnicas LID em cada bacia no cenário 01

Sub-bacia	LID implantada	Percentual equivalente da LID implantada na sub-bacia (%)
01	Telhado verde	13,10
02	Telhado verde + Pavimento Permeável	19,13
03	Telhado verde	16,30
04	Telhado verde	38,30
05	Telhado verde	16,40
06	Telhado verde	0,10
07	Telhado verde	40,70
08	Telhado verde	20,00
09	Telhado verde	26,00
10	Telhado verde+Pavimento permeável+Trincheira de infiltração+Poço de infiltração	19,63

As simulações realizadas com a chuva de duração de 20 min, para o cenário 02, resultaram nas vazões nos valores de 1,79m³/s para TR de 01 ano; 3,79m³/s para TR de 02 anos; 6,73 m³/s para TR de 10 anos e 7,25 m³/s para TR de 15 anos (Figura 45). A inserção das técnicas LID neste cenário resultaram na redução da ordem de 27,53% da vazão para TR de 01 ano, 30,59% para TR de 02 anos, 36,15% para TR de 10 anos e 35,95% para TR de 15 anos quando comparado ao cenário sem inserção de técnicas LID.

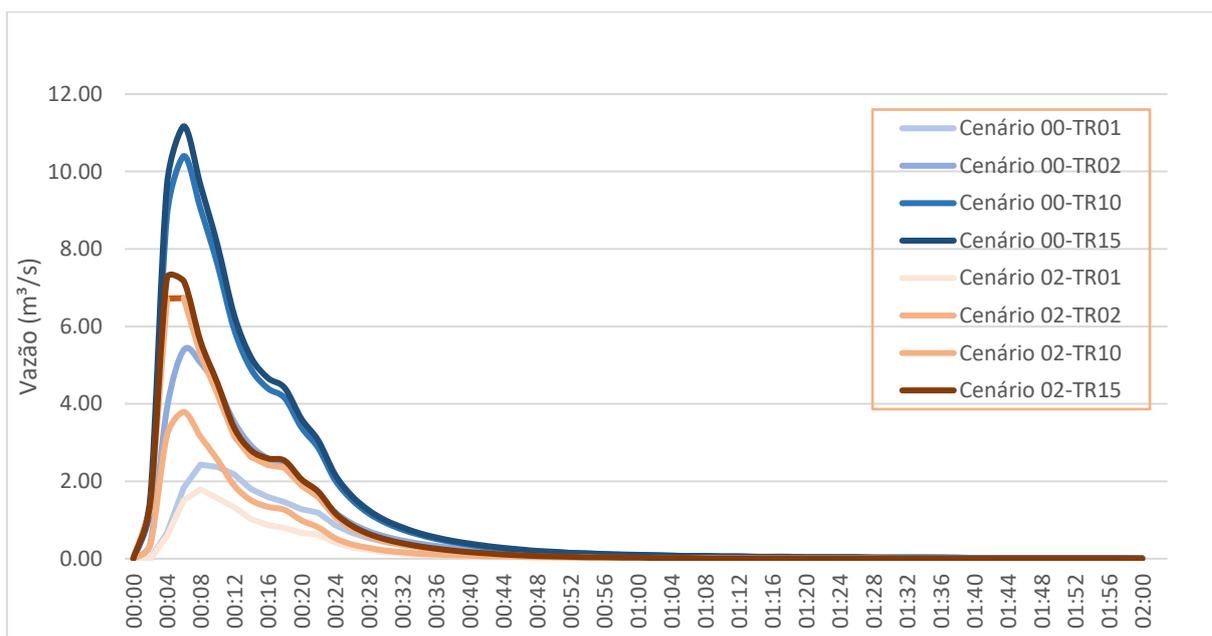


Figura 45 - Escoamento na bacia no cenário 00 e cenário 02

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No gráfico da Figura 46 são apresentadas as alturas das lâminas de água alcançadas nos cenários zero (barras com tons de azul) e cenário 02 (barras com tons marrons). A alteração na configuração da bacia pelo cenário 02 foi capaz de reduzir toda a lâmina gerada no nó 01. Neste cenário a modificação da bacia reduziu as lâminas de água na faixa absoluta de 2 a 38 cm. A lâmina máxima reduzida (38 cm) foi identificada na simulação com TR de 15 anos para o nó 02. Para as lâminas do nó 05 e 06 as alterações no nível de água foram pouco expressivas, com redução máxima de 5 cm.

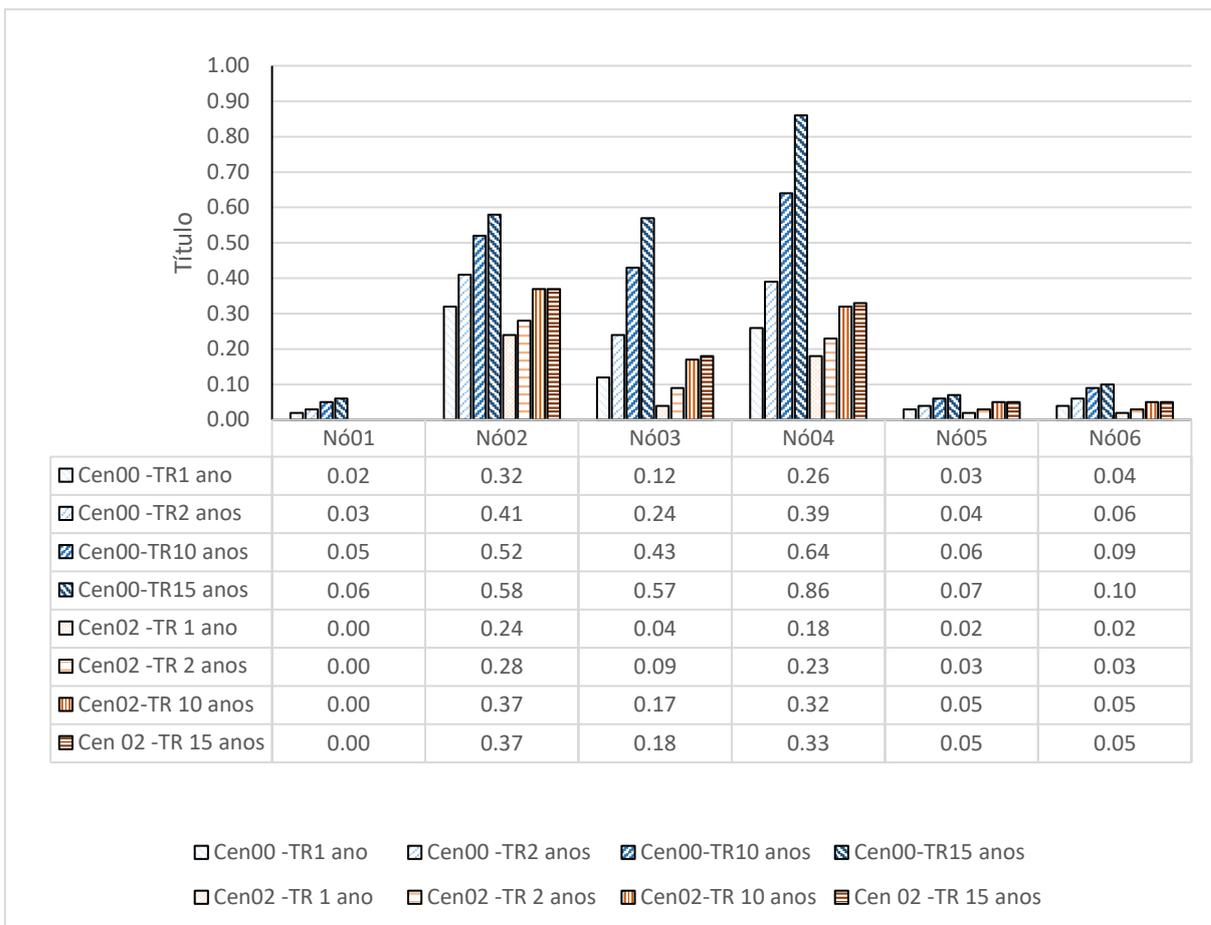


Figura 46 - Comparação das lâminas d'água nos Cenários 00 e 02
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nos gráficos bloxplot da Figura 47 são apresentadas as variações dos parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias nos diferentes tempos de retorno do cenário 02. Há uma tendência de aumento da capacidade de infiltração nas sub-bacias com o aumento do tempo de retorno. Assim como nos demais cenários, a partir do tempo de retorno de 15 anos houve uma tendência de manutenção da mediana do volume infiltrado, resultado da saturação da técnica LID após esse tempo de recorrência. Os volumes escoados e o armazenamento nas bacias obtidos nas simulações com TR de 10 e 15 anos apresentaram valores próximos.

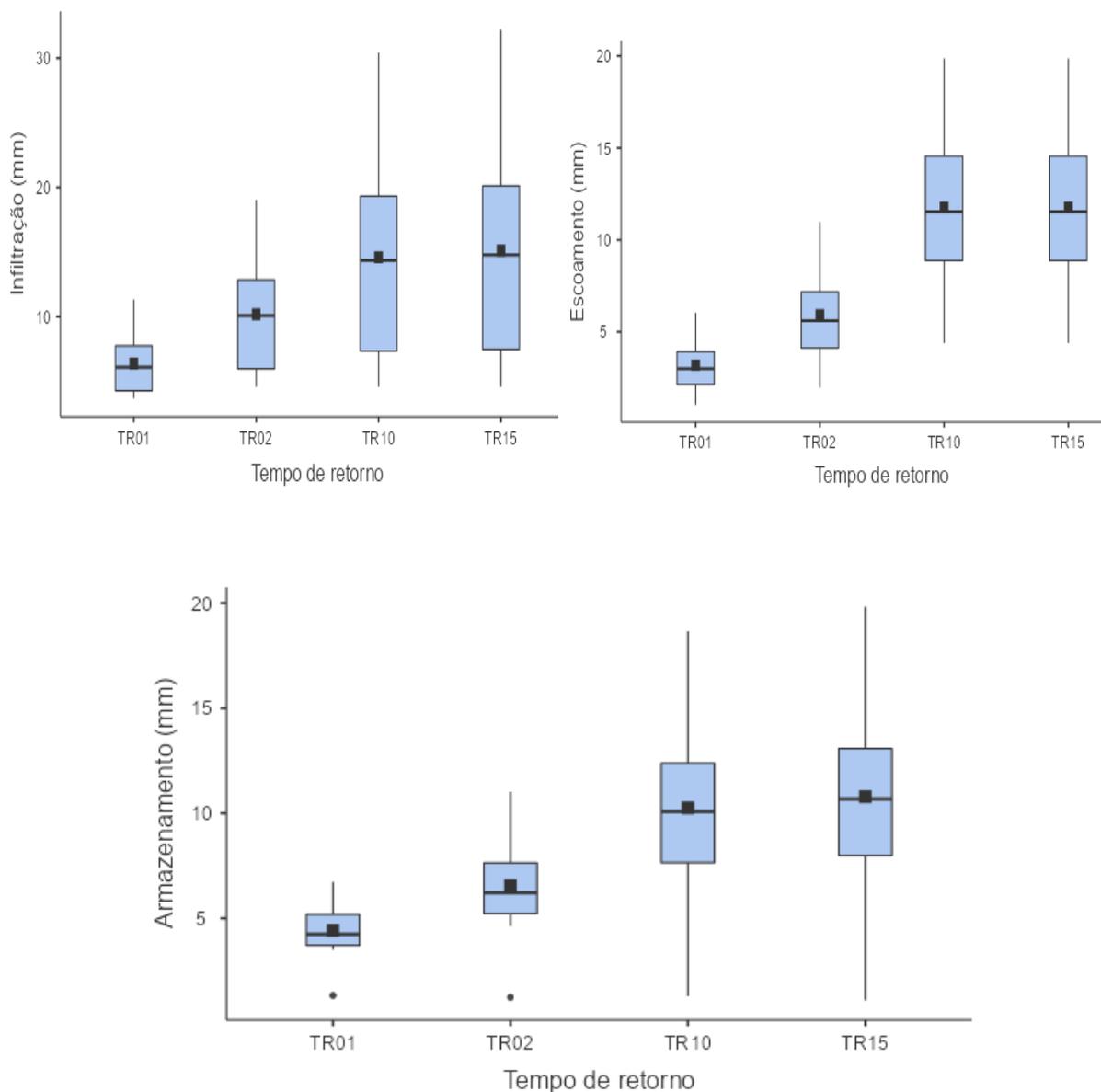


Figura 47 - Bloxplot para os parâmetros do balanço hídrico estimados para as sub-bacias em diferentes tempos de retorno no cenário 02

Considerando a situação que reproduz os resultados observados nos alagamentos da bacia (chuva com TR01 ano e duração 20 minutos), observa-se que as alterações na bacia propostas pelo cenário 02 resultam em altas taxas de aumento na infiltração das sub-bacias em relação à capacidade de infiltração do cenário zero (Tabela 23). A modificação poderia resultar no aumento superior a duas vezes a capacidade de infiltração atual da sub-bacia 04.

Assim como no cenário 01, não houve alteração significativa de inserção de LID na sub-bacia 06 (apenas 10% de telhados verdes), já que a bacia é altamente permeável e possui poucas edificações. A modificação na bacia não foi capaz de gerar alterações no volume infiltrado e reduziu muito pouco o escoamento da sub-bacia.

Tabela 23 - Escoamento e vazão para chuvas com TR de 1 ano

Sub-bacia	Infiltração Cenário 00 (mm)	Infiltração Cenário 02 (mm)	Aumento da infiltração (%)	Escoamento Cenário 00 (mm)	Escoamento Cenário 02 (mm)	Redução do escoamento (%)
SB01	5,70	6,40	12,3%	6,12	4,09	33,2%
SB02	1,59	3,93	147,2%	9,57	5,54	42,1%
SB03	7,63	8,14	6,7%	4,52	2,30	49,1%
SB04	1,57	3,97	152,9%	9,77	3,43	64,9%
SB05	2,32	3,69	59,1%	8,93	6,04	32,4%
SB06	11,33	11,33	0,0%	1,36	1,34	1,5%
SB07	3,53	5,17	46,5%	7,94	2,10	73,6%
SB08	5,67	6,59	16,2%	6,17	3,19	48,3%
SB09	4,48	5,78	29,0%	5,97	2,81	52,9%
SB10	8,32	8,78	5,5%	3,48	1,04	70,1%

Acerca da influência das LIDs nos nós críticos, estima-se a redução do escoamento em até 49,1% na sub-bacia 03 que tem exutório no nó crítico 02. A redução máxima do volume de escoamento gerado é estimada em 73,6% na sub-bacia 07, aquela que possui maior proporção em área de telhados verdes capazes de contribuir para a redução da lâmina d'água no nó 03. Seus resultados satisfatórios também estão associados à baixa inclinação da técnica LID que facilita a infiltração da água. A redução da lâmina no nó 04, que também é um nó crítico, foi resultado das maiores reduções observadas nas sub-bacias por ele alimentadas (SB09 e SB10).

Observa-se que algumas reduções no escoamento das bacias são próximas em termos percentuais, como é o caso das bacias 07 e 10 (Tabela 24). Neste cenário a bacia 07 que é altamente edificada foi modificada apenas com telhados verdes (40,70% da bacia - área de 0,9 ha) enquanto a sub-bacia 10, que tem característica mais permeável e área disponível para modificações, recebeu a inserção de Telhados verdes, Pavimento permeável, Trincheira de infiltração e Poço de infiltração, que em conjunto correspondem a 19,63% de sua área total (3,18 ha). Embora as sub-bacias tenham configurações diferentes em relação ao uso do solo, à declividade, ao tempo de concentração, à área, a sua compacidade, forma e índice de circularidade que interferem na dinâmica de escoamento, observa-se que uma área menor de telhados verdes foi capaz de reduzir o escoamento em uma bacia mais compacta, como no caso da sub-bacia 07, em proporção próxima a redução do escoamento gerada por LIDs implantadas em conjunto com maior área em bacia mais alongada, como observado na sub-bacia 10.

Tabela 24-Infiltração e escoamento gerado para chuva crítica com TR 02 anos (Cenário 02)

Sub-bacia	Infiltração Cenário 00 (mm)	Infiltração Cenário 02 (mm)	Aumento da Infiltração (%)	Escoamento Cenário 00 (mm)	Escoamento Cenário 02 (mm)	Redução do escoamento (%)
SB01	5,70	6,40	12,3%	6,12	4,09	33,2%
SB02	1,59	3,93	147,2%	9,57	5,54	42,1%
SB03	7,63	8,14	6,7%	4,52	2,30	49,1%
SB04	1,57	3,97	152,9%	9,77	3,43	64,9%
SB05	2,32	3,69	59,1%	8,93	6,04	32,4%
SB06	11,33	11,33	0,0%	1,36	1,34	1,5%
SB07	3,53	5,17	46,5%	7,94	2,10	73,6%
SB08	5,67	6,59	16,2%	6,17	3,19	48,3%
SB09	4,48	5,78	29,0%	5,97	2,81	52,9%
SB10	8,32	8,78	5,5%	3,48	1,04	70,1%

Além dos dois cenários com LID, foi avaliado os resultados de um terceiro possível cenário que previa a inserção de cisternas nas edificações com área superior a 100m² em toda a bacia 08 (para intensificação da redução da contribuição até o nó 03), troca do Jardim na bacia 02 por pavimento permeável cobrindo toda a área do calçadão e desconexão dos telhados nas edificações próximo às áreas verdes na bacia 10. Contudo, essa sugestão apresentou alterações inexpressivas nos resultados em termos de redução dos alagamentos. Essas modificações buscaram atender a capacidade máxima de área disponível e aptas para inserção de LID nessas bacias, porém não foi possível alcançar resultados mais promissores que os resultados alcançados com os cenários já simulados.

Ressalta-se que, em função da pequena quantidade de caixas com grelhas do sistema de microdrenagem além da ausência de dados sobre sua infraestrutura, as perdas pelo sistema de captação foram desprezadas. Portanto, as lâminas devem ser menores em função do escoamento direcionado para a rede de drenagem.

Diante do exposto, compreende-se que por ser uma região de planície que concentra a contribuição de todas as sub-bacias, recebendo as contribuições principais advindas de sub-bacias como a do bairro Observatório, altamente impermeabilizado e com altas declividades, sempre haverá alagamentos para as chuvas críticas a menos que sejam adotadas medidas para redução do escoamento. Se a bacia não apresentasse restrições para inserção das técnicas quanto a declividade, proximidade de áreas de captação de água para consumo e zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático (áreas próximas às fontes de água no parque), além do espaço restrito em planta na bacia que não possibilita a inserção de técnicas com maior

capacidade de redução dos efeitos do escoamento, as técnicas poderiam ser mais efetivas. Os cenários aqui simulados seriam capazes de minimizar os efeitos dos alagamentos, porém não eliminá-los totalmente.

5.4.4. Análise geral dos cenários

Em geral, as técnicas LID contribuíram para redução do escoamento superficial das bacias isoladas a uma taxa variando entre os TR simulados (1, 2, 10 e 15 anos) de 23,64% a 27,16% no cenário 01 e de 43,98% a 46,80% no cenário 02 enquanto para a taxa de redução da vazão de pico compreendeu o intervalo de 16,86% a 21,24% no cenário 01 e 32,15% a 37,88% no cenário 02. Esses resultados se aproximam daqueles apresentados em estudos já elaborados anteriormente com a aplicação das técnicas LID testadas por Júnior, Paz e Reis (2023); Rodrigues e Júnior (2020). Além de Tejadas, Possanti e Marques (2019) que abordaram um conjunto de pavimento permeável e trincheira de infiltração aplicadas em maior extensão cobrindo 75% de sua área de estudo, alcançando redução na vazão de pico de até 39%.

Embora os resultados apontem uma redução da lâmina d'água, o alagamento reduzido no cenário mais promissor (cenário 02) ao final da simulação (2h) com recorrência de 01 ano ainda superará a capacidade da calha no nó 02 (alcançando 24 cm) e continuará com lâmina observável inferiores a 10 cm nos condutos (Figura 48b). No cenário menos permeável as lâminas permanecem abaixo de 20 cm (Figura 48a). Deve-se considerar também que a redução do nível d'água depende da área de alagamento, pois para o mesmo volume em áreas diferentes resultará em lâminas d'água diferentes a ser reduzida. Assim, uma área maior formará lâminas d'água menores para um mesmo volume de alagamento, portanto surtirá efeitos perceptíveis menos impactantes.

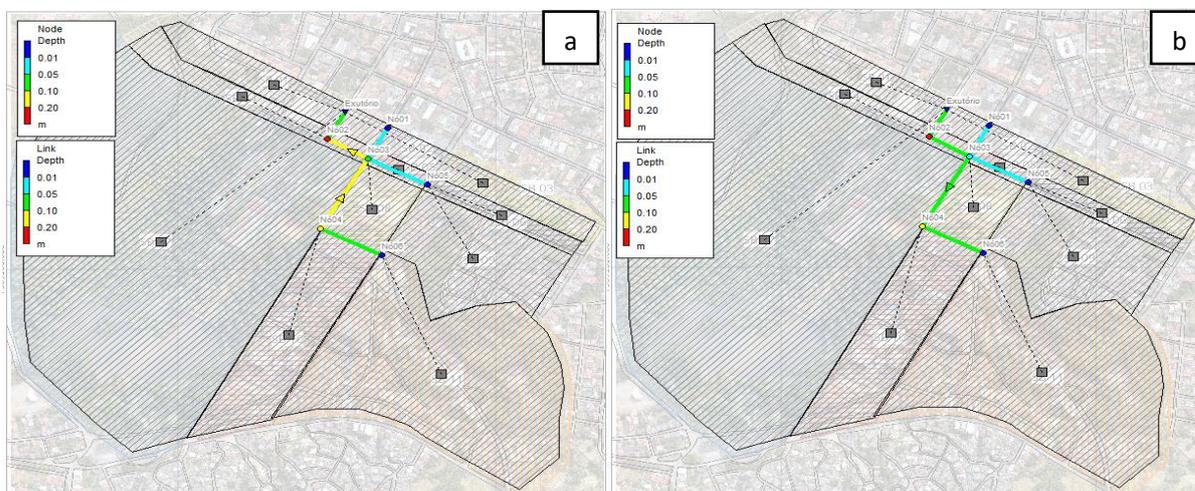


Figura 48 - Lâminas de alagamento ao final dos eventos simulados nos cenários 01 (a) e 02 (b)

Na análise do conjunto da bacia, até o TR 15 anos para o cenário 01 e TR de 10 anos para o cenário 02 há um aumento da eficiência da taxa de abatimento da vazão de pico na bacia (Figura 49), o que não foi relatado por Gnecco e Palla (2015) que constatou um comportamento de redução da performance hidrológica das técnicas LID, indicando redução linear da taxa entre os tempos de retorno de 2 a 10 anos, para uma taxa percentual de 36% de permeabilização da bacia. Esse episódio está associado ao desempenho do sistema que é dado em função da capacidade de armazenamento efetivo das técnicas LID (GNECCO; PALLA, 2015). Desse modo, para acompanhar a variação de volume gerado pelo aumento da precipitação, seria necessário uma capacidade maior da LID. A LID tem potencial para aplicação, porém sua limitação de eficiência está associada aos poucos espaços disponíveis para implementação em áreas urbanas já consolidadas. Para TR maiores (TR 50 e 100 anos), a eficiência de abatimento é reduzida conforme o aumento da intensidade (Figura 49), tendo em vista o maior volume de chuva associado aos eventos de menor frequência.

Quanto ao volume de escoamento, a taxa de redução também decai com o aumento da intensidade (maior TR e mesma duração) visto que há um aumento do volume e do pico da chuva, porém a capacidade de retenção da técnica LID é mantida constante. A queda na eficiência da redução do escoamento também é relatado por Zanandrea e Silveira (2019); Júnior, Paz e Reis (2023) que apontam a tendência de redução para o abatimento do escoamento, porém limitado a eventos associados até o TR de 20 anos. Esses resultados apoiam a assertiva de Fava et. al. (2022) que apontam que as técnicas sejam aplicadas para mitigar os alagamentos associados aos eventos mais frequentes obtidos para TR menores que 10 anos.

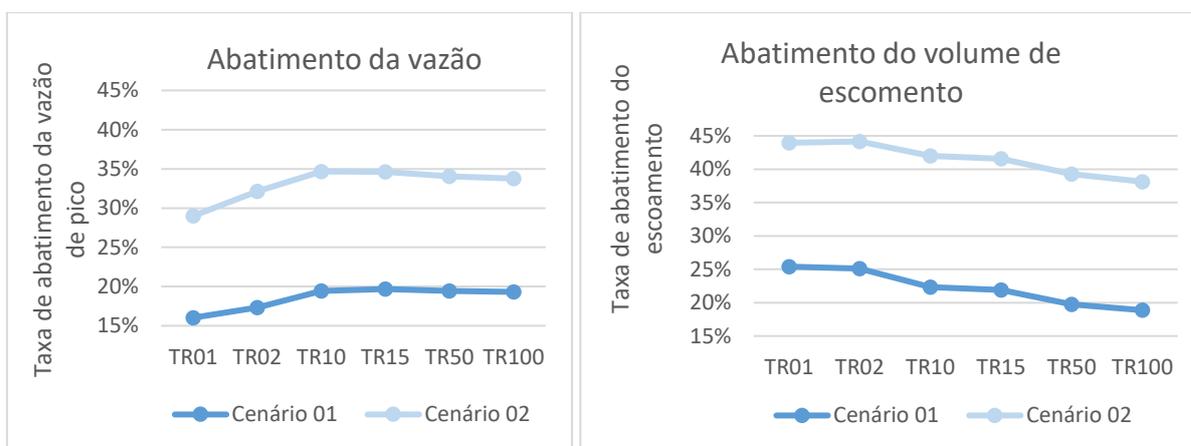


Figura 49 - Comparação da taxa de redução da vazão de pico (a) e do escoamento superficial (b) para diferentes tempos de retorno

A taxa de redução da vazão alcançou os valores médios de 17,76% no cenário 01 e 32,55% no cenário 02 (TR de 1 a 15). Entre os TR de 50 e 100 foram alcançados os respectivos índices médios de 18,56% no cenário 1 e 34,03% no cenário 2.

Em função da baixa disponibilidade de área para implantação do sistema LID, não foi possível analisar os efeitos individuais de todas as técnicas sobre o escoamento total da bacia, exceto para os telhados verdes, que tiveram aplicações isoladas em determinadas bacias. Seleccionadas as bacias 08 e 09 para análise, foram observadas as variações para os eventos dos TR extremos (menores e maiores) simulados neste trabalho. Nota-se que os telhados verdes (TV) embora tenham influenciado a redução da vazão de pico e escoamento, não foram capazes de aumentar o tempo de resposta da bacia, pelo contrário, a vazão de pico sofre adiantamento (redução) variando de 2 a 16 minutos para os tempos de retorno (Figura 50).

O contrário é apontado por Rodrigues e Júnior (2020), que ao simular telhados verdes não verificou redução no tempo de resposta da bacia apresentando aumento de 2 minutos para eventos de 5 a 25 anos e nenhum para eventos com TR de 100. Júnior, Paz e Reis (2023), não identificou nenhuma capacidade para atrasar e nem mesmo antecipar, permanecendo constante o tempo de pico da vazão nas simulações com TV. A variação no tempo de pico da bacia pode ser explicada pelo fato de que o intervalo desde o início até o pico de intensidade para eventos de baixa frequência independe da intensidade da chuva (PALLA; GNECCO,2015). Nesse intervalo, a curva do hidrograma do cenário modificado permanece com uma pequena variação à direita do hidrograma do cenário não modificado indicando, como esperado, o atraso do hidrograma, ainda que a vazão seja antecipada. Há uma tendência de influência das características da bacia sobre o tempo da vazão de pico. Nas bacias menores, como é o caso das bacias analisadas, a ocorrência do escoamento mais rápido tende a antecipar a vazão.

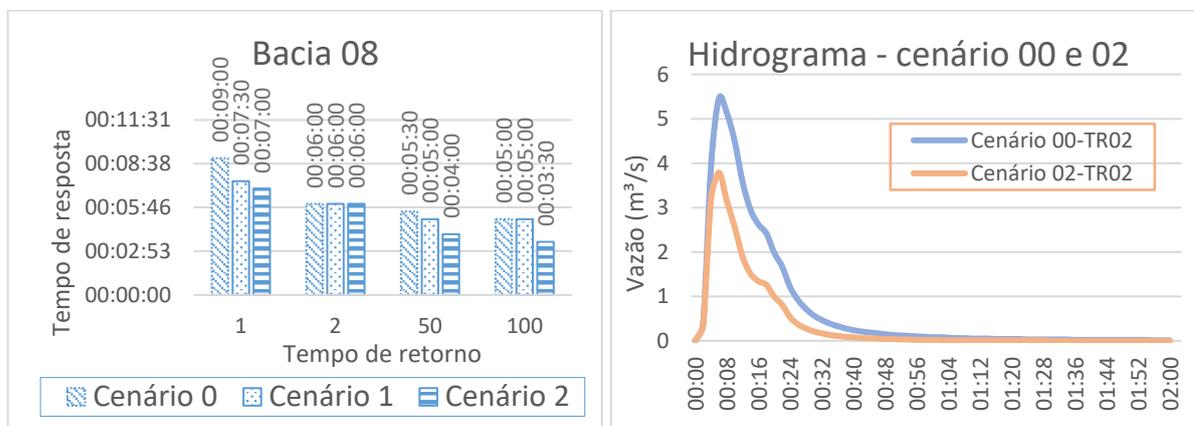


Figura 50 - Tempo de resposta da bacia 8 e hidrograma do cenário 00, 01 e 02
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A aplicação conjunta das bacias foi analisada na sub-bacia 02 que recebeu a inserção de Telhado Verde (TV) e Jardim de Chuva (JC) no cenário 01 e TV e Pavimento Permeável no cenário 02 e, a bacia 10 que recebeu TV, PP, Trincheira e poço de infiltração em ambos os cenários (Figura 51). Essas aplicação também apresentou a mesma tendência de redução no tempo do resposta da bacia, mantendo tendência constante para o os TR de 50 e 100 anos na sub-bacia 02.

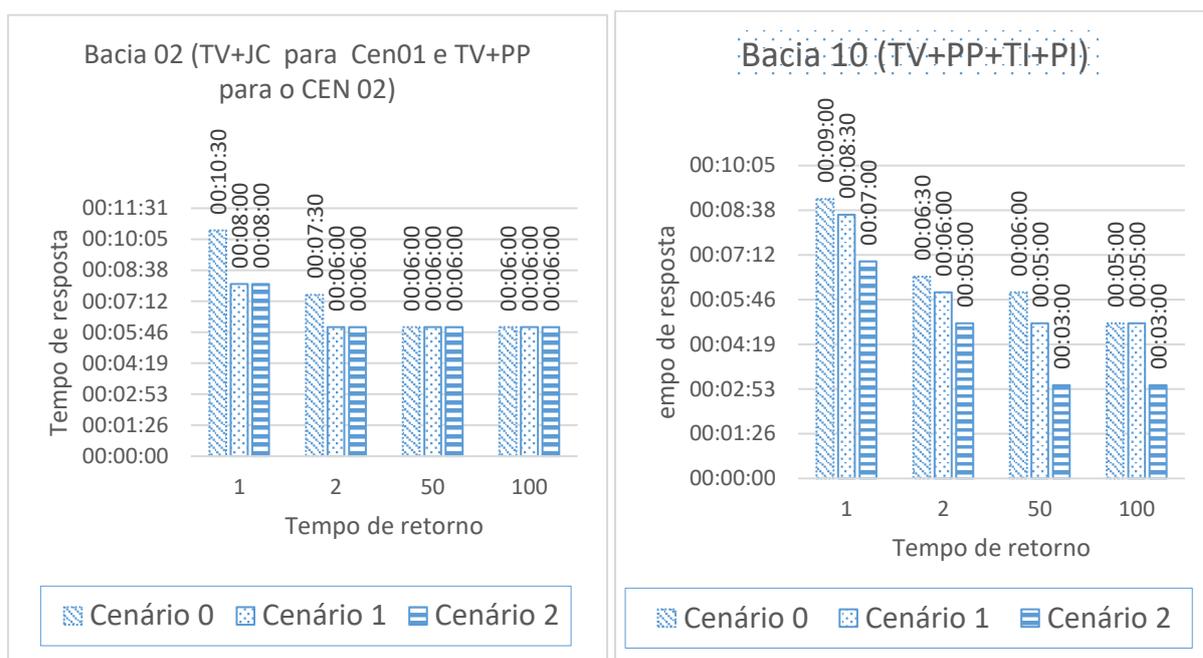


Figura 51 - Tempo de resposta das bacias que possuem aplicação de conjuntos LID
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Acerca das informações disponíveis para a alimentação do modelo é necessário apontar que o modelo SWMM requer a adoção de parâmetros de campo porém, na ausência destes, são aceitos parâmetros literários, viabilizando o emprego da ferramenta em um cenário muito comum na realidade dos municípios que enfrentam a dificuldade de obter informações de campo.

A determinação precisa do tipo de solo local necessário para determinar os parâmetros de infiltração da bacia, pode ser uma das informações mais difíceis de serem obtidas pois demandaria a estratificação dos solos por meio de sondagens. Em Minas Gerais o que se tem disponível é o mapa de solos gerado pela UFV/UFLA (empregado neste estudo). No entanto, o mapa possui escala pequena (1:650.000) e representa baixa precisão para este tipo de trabalho que requer maior nível de detalhes do solo. Embora pouco preciso, o material oferece um

parâmetro médio da classificação do solo e pode auxiliar o modelo a gerar resultados medianos, aceitáveis para estudos preliminares.

Dado que a precisão da modelagem é influenciada pela precisão das informações que a alimenta, evidencia-se outros três pontos que influenciam os resultados das simulações: 1) o nível de detalhamento da topografia; 2) representação da capacidade da rede de drenagem; e 3) a incerteza nas mudanças aceleradas no uso da terra (WANG et. al., 2018).

A representação do terreno visa caracterizar os padrões de fluxo na bacia, a existência de depressões e características do relevo que resultam no acúmulo de água gerando as inundações. Como geralmente as simulações são realizadas com base nas imagens de Modelos Digitais de Terreno (MDT), a qualidade dos resultados está intimamente ligada às resoluções dos MDTs, que devem ser adequadas para a escala de estudo a fim de não gerar fontes de incertezas (SANTOS et. al., 2023). Dependendo da finalidade do estudo a aplicação dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) também é válida, contudo prevalece a necessidade de resoluções adequadas à escala de estudo. O MDE tem por facilidade a delimitação das edificações o que possibilitaria em softwares de modelagem hidrodinâmica a limitação de áreas alagadas mantendo o caminho real do fluxo. Neste estudo, considerando que o SWMM demanda apenas a declividade das bacias e as cotas do sistema de drenagem (poços de visita e canais), o MDT seria mais adequado para a interpolação da declividade média das bacias. Porém, independente do modelo adotado, como o SWMM é um modelo unidimensional qualquer um dos modelos seriam aceitáveis, e caso seja feita acoplagem do modelo SWMM a outros softwares para simulações bidimensionais em escala urbana, o MDE seria uma ferramenta passível de avaliação.

O levantamento com drone foi satisfatório para este trabalho, não apenas pela topografia obtida pelo modelo digital gerado, mas também pela ortofoto em vista sua alta resolução. Com a praticidade do levantamentos aerofotogramétricos, essa é uma alternativa adequada à obtenção de informações para modelagens hidrodinâmicas que é altamente sensível a variações da topografia. Há outras alternativas para a obtenção da topografia, porém a aerofotogrametria com imagens de drones é mais produtiva quando são superadas suas limitações como regiões com velocidade do vento superior ao seu arrasto, duração de bateria do aparelho e baixa distância focal (maiores distâncias focais permitem atingir maior altura de voo para obter a mesma representação do pixel projetado proporcionando alcançar maior área de cobertura e maior produtividade). Porém, é válido ressaltar que o pós-processamento exigirá

compatibilidade dos drones com os softwares de processamento de imagens, sendo geralmente são pagos. Além disso, dependendo do tamanho da área de estudo, será necessário um computador com capacidade de hardware mais robusta para o processamento das imagens.

A estimativa da evaporação, a determinação da capacidade de escoamento do sistema de drenagem e as estimativas do volume de infiltração e escoamento superficial são essenciais para garantir a acurácia do balanço hídrico. Nos projetos de drenagem urbana, geralmente não é considerado a variável de evaporação, mais aplicável a bacias rurais. Contudo essa, é uma variável que pode ter parcela influenciável em bacias com presença de grandes reservatórios e elevada taxa de vegetação densa em função da evapotranspiração. Sendo assim, para trabalhos aplicáveis a bacias com maiores dimensões, voltadas principalmente para a análise de inundações é importante também considerar os aspectos climatológicos (temperatura, velocidade do vento, umidade do ar e radiação solar), além do tipo de solo (solos arenosos úmidos têm maior taxa de evaporação que solos argilosos úmidos) e o tipo de vegetação (influenciam a transpiração e interceptação vegetal). O modelo SWMM possui a funcionalidade para estimativa da evaporação.

Já a capacidade de escoamento do sistema de drenagem influencia no volume de água propagado superficialmente. A água captada pelo sistema de drenagem reduz a lâmina superficial até que se atinja a capacidade da rede e, assim interfere no volume acumulado ao longo do tempo antes que se forme a lâmina d'água do alagamento. Para avaliar a capacidade de escoamento do sistema de drenagem, seria necessário o conhecimento da infraestrutura da rede, que em municípios pequenos, geralmente não é uma informação muito acessível. Considerando a forma de adaptação adotada pela configuração de canal no modelo SWMM para simular alagamentos em calhas de ruas (calhas aboradas como canais), não foi possível encontrar uma funcionalidade no SWMM que permita incluir as perdas pelo sistema de captação da microdrenagem.

A infiltração e o escoamento superficial dependem de um adequado mapeamento do uso do solo que consiga quantificar as áreas permeáveis e impermeáveis o mais próximo ao cenário real, sendo este também um parâmetro dependente da resolução das imagens aéreas. Embora nesse trabalho tenha sido empregado o uso de imagens com alta resolução, uma das dificuldades encontradas na classificação do uso do solo foi o conflito entre pixels de diferentes classes. A imagem digital captou padrões RGB muito próximos entre as classes. Ainda que com um expressivo volume de amostras de imagem coletadas, a análise da imagem não era capaz de diferenciar as classes com acurácia, isso porque o processo de classificação agrupa pixels com

valores espectrais semelhantes na mesma classe. Para solucionar isso, optou-se por delimitar áreas menores na imagem restringindo classes bem definidas, de modo que as diferentes classes com a mesma tonalização de cor não ocupassem o mesmo recorte de imagem que seria usado na classificação. Assim, o conflito entre as categorias foi minimizado e, posteriormente por meio da união das imagens, a classificação foi preservada com melhor delineamento das classes.

Por fim, a influência das incertezas e mudanças aceleradas no uso da terra exige a atualização periódica das simulações alimentando-as com as alterações das características locais para entender as variações de demanda de infraestrutura de drenagem ao longo do tempo.

No que tange aos dados de chuva, infelizmente o Brasil ainda possui baixa densidade de postos pluviométricos e pluviográficos (BRAGA et. al, 2021). Dentre aqueles disponíveis, há postos com séries curtas, falhas e dados insuficientes para subsidiar alguns estudos. Nesse sentido, as equações IDF, os ajustes de funções matemáticas (distribuições de probabilidades) aos dados de chuva existentes e a regionalização das equações de chuvas intensas são ferramentas bastante úteis para obter dados ainda que teóricos (BRAGA et. al, 2021). A escassez temporal dos postos limita a determinação das chuvas intensas pois depende de uma série histórica mínima com 30 anos de dados. Por outro lado, a escassez espacial dos postos ou ausência de equações IDF locais tem como alternativa o uso de dados de postos de outras bacias, porém devido a variabilidade espacial da chuva isso pode resultar em erros significativos (BRAGA et. al, 2021).

Neste trabalho foi possível basear o estudo das chuvas com dados de precipitação existentes. No processo de distribuição temporal da chuva foi aplicado o método de Huff, que se mostrou satisfatório para a determinação do hietograma de projeto. Também foi avaliada a aplicação da metodologia dos blocos alternados, porém os resultados obtidos nas simulações com hietogramas gerados por este método com pico de intensidades centrais são mais críticos, o que em bacias urbanas pequenas não reflete estatisticamente a realidade local, superdimensionando os projetos (ABREU et. al., 2017). Os picos do método dos blocos alternados são mais elevados que os picos gerados por Huff 1º quartil, porque no segundo método há maior capacidade de infiltração do solo no início da precipitação. Isso se explica pois, se o pico da intensidade da chuva ocorre no começo do evento, só uma parcela da chuva gerará escoamento superficial, o restante irá atender as perdas iniciais (infiltração e abstração inicial), provocando assim, uma vazão menor. No segundo caso, com a saturação do solo e a

abstração inicial já satisfeitas, iniciará o escoamento superficial e a precipitação efetiva será análoga ao total precipitado provocando uma vazão maior (ABREU et. al., 2017). Portanto, o método dos blocos alternados pode ser adequado para o dimensionamento de projetos situados em bacias de grandes dimensões.

Quanto a calibração do modelo, embora não foi possível obter parâmetros de vazão e/ou eventos pluviométricos monitorados para essa etapa, a ciência cidadã que se valeu das informações coletadas por relatos dos cidadãos, documentadas no diagnóstico do Plano Municipal de Saneamento do município e, os registros de vídeos e imagens (divulgadas pela população em meio digital), correlacionada aos dados de campo, contribuiu para compreender o comportamento das chuvas mais recorrentes e a formação dos alagamentos.

Os parâmetros aplicados na calibração do modelo (rugosidade, CN, profundidade impermeável e parâmetros de armazenamento) também foram analisados para avaliar sua influência sobre os resultados gerados em simulações. Analisando os efeitos da aplicação do parâmetro médio de rugosidade das áreas impermeáveis das bacias ($\eta=0,018$) com a aplicação homogênea do coeficiente para asfalto liso ($\eta=0,011$) e blocos de concreto com alta vida útil ($\eta=0,029$), obteve-se para asfaltos lisos um aumento de 1,4% no volume de escoamento da bacia e um aumento de 22% na vazão de pico enquanto o coeficiente de rugosidade para bloquetes com bastante tempo de uso reduziu em 1,3% o volume de escoamento e em 19,43% a vazão de pico (Figura 52).

O parâmetro *Curve Number* reduzido em até 20% apresentou redução, embora desprezível, apenas no volume de escoamento (-0,03%). Neste caso, o parâmetro foi reduzido na mesma proporção em todas as sub-bacias, obtendo um $CN_{\text{médio}} = 69$, que ainda é um valor com potencial para geração de escoamento dependendo da classe do solo empregado. Seu aumento em 20% (Figura 52) implicou a redução expressiva da infiltração (-31,35%) compensada no aumento do escoamento (26,12%), da vazão de pico (1,62%) e do armazenamento (14,67%).

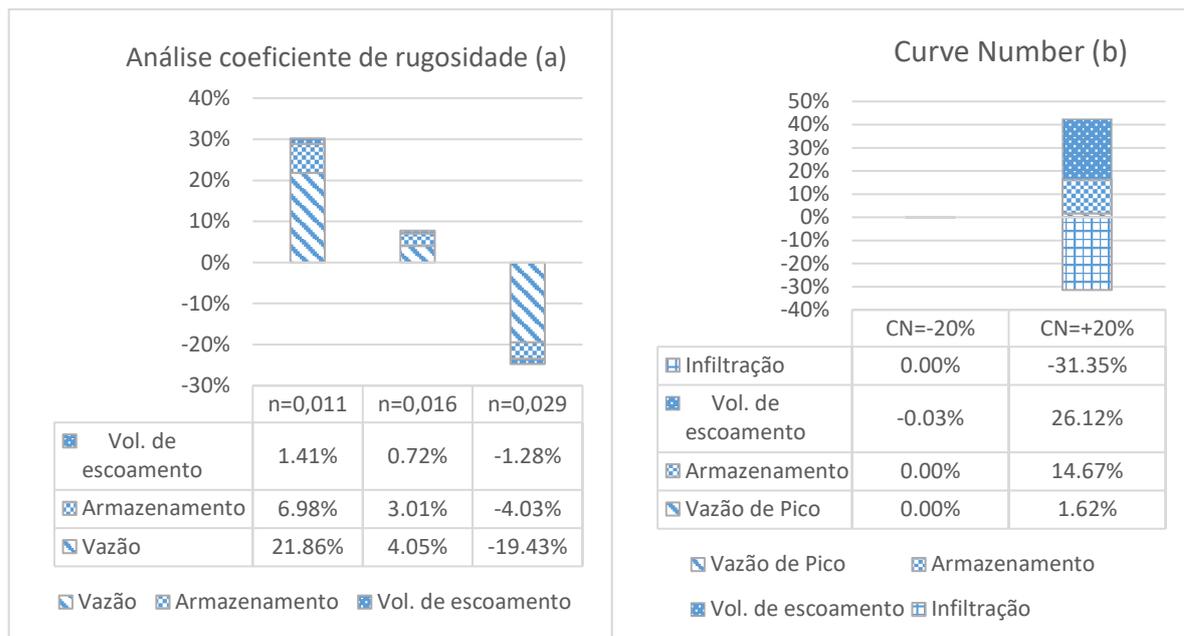


Figura 52 - Taxa de variação do volume do escoamento superficial, armazenamento, infiltração e vazão em função do coeficiente de rugosidade (a) e CN (b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O armazenamento em depressões é estimado pelo SWMM por meio da lâmina de armazenamento (Dstore-Imperv) e da parcela da área impermeável que não possui armazenamento em depressões (%ZeroImperv). Estes parâmetros se tornaram úteis na calibração do evento gerador dos alagamentos recorrentes, porém é importante sempre lembrar que quanto maior for acrescida a lâmina e quanto mais for reduzida a taxa de área sem armazenamento, maiores serão os volumes retidos nas depressões, e isso poderá gerar resultados que suprimem volume de água, reduzindo erroneamente a vazão e o volume de escoamento.

O efeito oposto também terá resultados negativos aumentando os valores dessas variáveis, portanto é necessário avaliar bem o percentual dedicado às áreas impermeáveis sem depressão, de modo que sejam condizentes com a característica da área de estudo, considerando seus efeitos adversos. Esses resultados são apresentados no gráfico da Figura 53 que indica as taxas de variação do escoamento e vazão obtidas com a redução (%ZeroImperv = 15%) e o aumento (%ZeroImperv = 35%) da taxa de áreas impermeáveis sem armazenamento quando comparados com o valor recomendado (%ZeroImperv = 25%) por Gironás, Roesner e Davis (2009). A redução em 10% do valor recomendado é capaz de reduzir a taxa em torno de 2% do escoamento, da vazão e do armazenamento (Figura 53a). O aumento em 10% deste parâmetro gera o aumento em cerca de 5,7% e 8,5% do volume escoado e vazão, respectivamente (Figura 53a).

A alteração da lâmina de armazenamento tem resultados mais expressivos dependendo da extensão da área com depressão. Simulando o aumento de 1mm na lâmina máxima recomendada pelo SWMM (2,54mm) houve redução em até 4,5% do escoamento e 7,5% da vazão. O aumento em 2mm duplicou a magnitude desses resultados (Figura 53b).

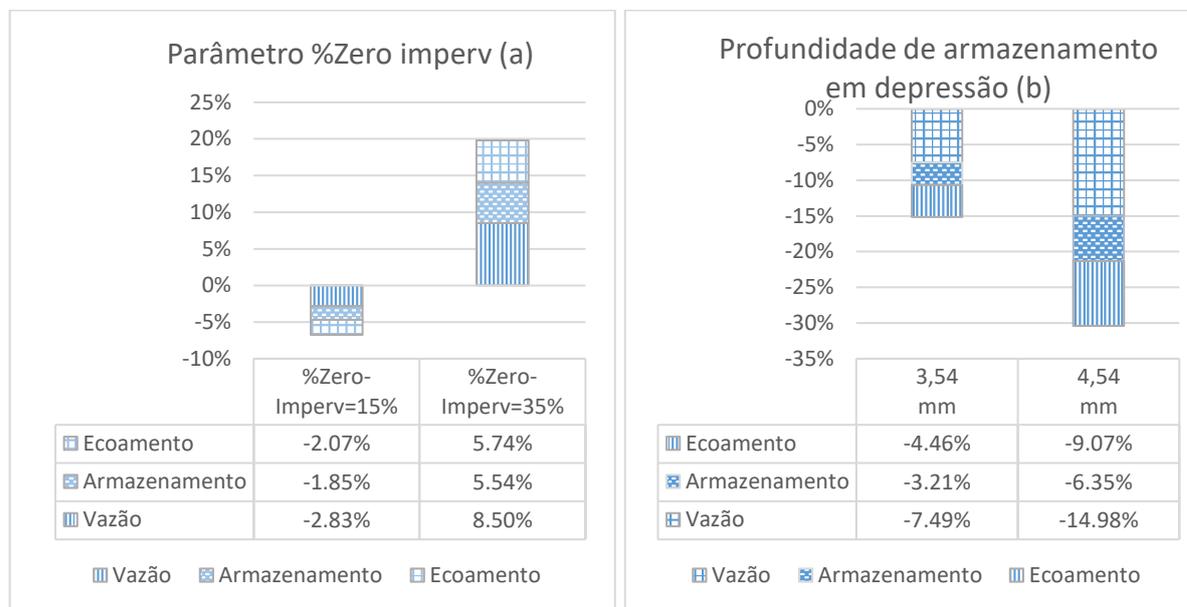


Figura 53 - Taxa de variação do volume do escoamento superficial e vazão em função dos parâmetros %Zero-Imperv (a) e Dstore-Imperv (b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Esses resultados são comparativos de simulações realizadas com a variação dos parâmetros do cenário referência com o ponto de apoio (lâmina d'água conhecida). Garcia et. al. (2004) analisou a aplicação desses mesmos parâmetros (exceto CN e %Zero Imperv) na calibração do modelo SWMM com vazões observáveis em campo. Embora pequenas variações numéricas, seus resultados indicaram que para eventos de alta intensidade simulados com parâmetros médios de rugosidade e de armazenamento há uma perda na qualidade da calibração, ainda que seus valores permaneçam em um intervalo de erro aceitável. Já para os parâmetros simulados com eventos de baixa intensidade, foi notado um aumento na vazão e no volume de escoamento. Essas alterações, geraram erros em torno de 9% na vazão e no volume de escoamento estimados para os valores reais. É com base nisso que deve ser reforçado a importância do monitoramento das bacias (pluviometria e fluviometria) a fim de obter dados de suporte à calibração para simulações mais precisas, minimizando as diferenças entre as observações de campo e as previsões do modelo computacional, diminuindo a subjetividade do processo. Além disso, é interessante que sejam avaliados os efeitos dos parâmetros sobre a calibração dos modelos de forma independente para eventos de intensidade diferentes, uma vez

que a simulação dos eventos de maior intensidade podem ser prejudicados se empregados parâmetros médios de calibração ou parâmetros aceitáveis para calibração de eventos com baixa intensidade.

Também foi avaliado a influência dos principais tipos de solo (silte, areia, argila) nas camadas das técnicas LID (Tabela 25) a fim de analisar a possibilidade de troca do material para ganho efetivo de eficiência, contudo não foram notadas diferenças no desempenho hidráulico das estruturas em reduzir as lâminas de alagamento, a vazão de pico e o volume escoado. Entende-se que a atual parcela de áreas impermeáveis não tenha sido compensada com a alteração do tipo de solo das técnicas LID, prevalecendo seus efeitos de escoamento sobre a parcela de área permeável.

Tabela 25 - Parâmetros variados com o tipo de solo da LID

	Areia	Argila	Silte	Arg. Arenosa
Vazão (m ³ /s)	○ 7,24	● 7,25	● 7,25	○ 7,24
Armazenamento (m ³)	○ 2425,82	☾ 2426,48	● 2428,45	○ 2425,82
Infiltração (mm)	● 237,24	● 237,24	● 237,24	● 237,24

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, é importante ressaltar alguns pontos que não devem ser negligenciados pelo usuário ao alimentar o modelo SWMM em avaliações de alagamentos: 1) Deixar de permitir alagamentos nos nós; 2) Deixar de atualizar o CN após inserção das técnicas LID; 3) Deixar de atualizar as taxas de áreas impermeáveis após inserção das técnicas LID; 4) Inserir de forma incorreta o fluxo captado pela LID; 5) Obter de resultados cronológicos com intervalos longos; 6) Inserir valores incorretos para áreas das bacias e por fim, 7) Negligenciar os índices de erros de continuidade na simulação do escoamento e da vazão inaceitáveis.

Se a profundidade da lâmina de água exceder a profundidade máxima permitida, o transbordamento simulado será perdido pelo sistema, a menos que seja permitido alagamentos nas simulações, assim o volume alagado será armazenado e reinserido no sistema (ZHU; CHEN, 2017). Com a reincorporação do volume de água após a formação do alagamento (abaixamento do nível d'água) a simulação não estará sujeita à subestimação dos resultados.

Com a inserção de LID, há um aumento nas taxas de áreas permeáveis e dependendo de sua extensão haverá alteração significativa do CN da bacia. A ausência de atualização desses parâmetros após modificação da bacia irá superestimar os resultados do SWMM.

Para as técnicas as quais seja previsto o reuso da água é necessário indicar ao sistema que o volume captado pelo LID retornará para a área permeável. Quando esse aspecto é

ignorado, o SWMM considera que o volume captado é direcionado para as áreas impermeáveis contribuindo para o fluxo superficial.

O modelo também permite obter resultados cronológicos com intervalos menores. Quando é necessário conhecer os resultados ao longo do tempo que exprima os valores extremos (máximos e mínimos) de determinada variável é interessante adotar intervalos menores evitando que nenhum valor seja suprimido pela espacialização de exibição de dados.

A área da bacia também refletirá efeitos sobre as estimativas, uma vez que os volumes (escoamento e armazenamento) são calculados em função da área e da lâmina de água. A área impermeável é dada em função de sua taxa sobre a área total da bacia e o volume de armazenamento em depressões no modelo SWMM é dado em função da área impermeável. Assim, se a bacia é inserida com valores bem maiores ou bem menores que o valor real, o volume de água será super ou subestimado. Portanto, é primordial atentar-se às unidades de medida do modelo e aos valores de entrada deste parâmetro.

Um das potencialidades do SWMM está no acompanhamento da consistência de suas simulações que poderá ser afetada pela inserção incorreta dos dados pelo usuário. Isso pode ser acusado pelo erro de consistência que para ser considerado de boa qualidade, segundo manual do SWMM de Rossman e Simon (2022), deve atender ao erro máximo de -0,39% e 0,03% na equação da continuidade para o escoamento e para a propagação do fluxo, respectivamente. Na visão de Júnior, Paz e Reis (2023) o intervalo de aceitabilidade pode chegar a 5%. Neste estudo, os resultados apresentaram erros com valores máximos de -0,07% e -0,02%, na simulação para escoamento e propagação do fluxo, respectivamente.

Como sugestão para trabalhos futuros, considerando que as técnicas LID avaliadas nesse estudo foram selecionadas em função dos espaços disponíveis para aplicação, sugere-se a avaliação da inserção de trincheiras no local das sarjetas. Rodrigues e Júnior (2021) empregaram essa técnica, obtendo redução em até 31,38% da vazão de pico, sendo outra alternativa para a redução dos alagamentos. Contudo, um fator questionável seria o comprometimento da infraestrutura inferior da pavimentação, podendo ser discutidas soluções para que a infiltração recebida pela estrutura não afete as estruturas do pavimento, devendo ser também avaliadas as declividades das ruas e espaço que não comprometam o leito carroçável. Até o presente momento, não foram encontrados estudos de relevância que se dediquem à avaliação dessa abordagem. Também é recomendado uma avaliação do tipo de solo e da capacidade de infiltração do solo existente para averiguação se há aplicabilidade de

medidas de infiltração no local. Essas análises complementares poderão embasar estudo de aplicação mais aprofundadas e estudos de viabilidade técnica.

5.4.5. Considerações sobre a bacia da lagoa do Parque das Águas

Sobretudo, qualquer sistema de drenagem exige a análise do comportamento do sistema tanto à montante como a influência à jusante (deságue) para analisar a possibilidade da ocorrência de remanso. Embora não tenha sido possível analisar todas as estruturas do sistema, é válido apontar que o alagamento recorrente na Avenida Camilo Soares pode ser intensificado pela interferência da capacidade de escoamento do Ribeirão Bengo, pois a rede de drenagem da Avenida Camilo Soares deságua na extensão de seu canal, que depende do nível de água na calha para ser escoada e não retornar à tubulação da rede à montante. Além disso, segundo gestor da drenagem urbana do município, não são realizadas com frequência a limpeza das bocas de lobo existentes, das quais é identificado a presença de raízes e galhos que acabam causando o entupimento das galerias que conduzem água ao canal do ribeirão. Ademais, o canal do ribeirão possui pequenas dimensões dificultando o escoamento da água do reservatório e da rede de drenagem da rua paralela em épocas chuvosas. Sua seção retangular, a variabilidade das dimensões ao longo de sua extensão e sua pequena declividade também não favorecem o ganho de velocidade da água (CAXAMBU, 2020).

Para entender como o comportamento do ribeirão Bengo afeta o escoamento da água da rede de drenagem é interessante compreender a estrutura de sua extensão. O Ribeirão Bengo recebe a contribuição fluvial de 20 nascentes. A nascente de origem aflora no Bairro Mombaça (porção rural sul de Caxambu), o curso d'água formado avança em paralelo à Avenida José Ferreira Leite margeando os Bairros Jardim das Nações e Vista Alegre, passa em frente ao Centro de Convenções de Caxambu (abaixo do Bairro Bosque) e, acessa a Lagoa do Parque das Águas - Anexo A (CAXAMBU, 2020).

A Lagoa do Parque das Águas é um reservatório artificial que oferece um aspecto paisagístico ao Parque turístico, além de funcionar como uma estrutura de retenção do Ribeirão Bengo (CAXAMBU, 2020). Em épocas de chuva intensa é comum a ocorrência de transbordamentos no reservatório do Parque que chega a inundar as áreas adjacentes atingindo as fontes de águas minerais próximas ao Lago, principalmente a fonte Ernestina Guedes (Figura

54).

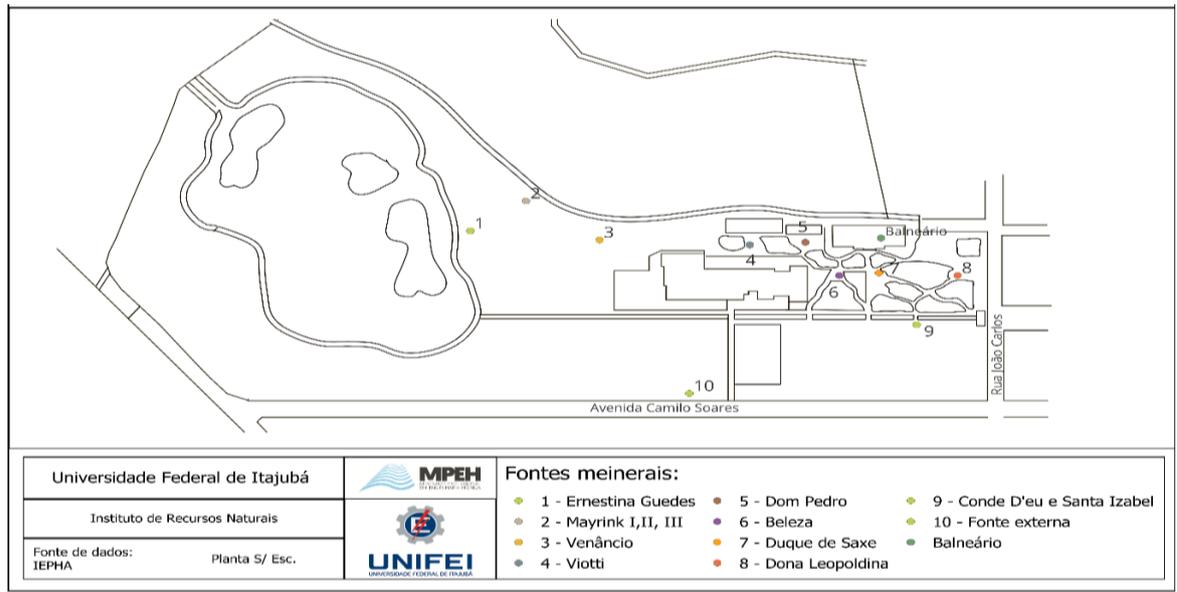


Figura 54 - Localização das fontes minerais do Parque
Fonte: Adaptado de IEPHA (2021)

Uma das consequências relacionadas ao transbordamento do Lago pode estar associado à capacidade reduzida de armazenamento do reservatório associado ao seu assoreamento (Figura 55). O processo de assoreamento é resultado do desequilíbrio entre o volume de material sedimentar e a capacidade de remoção pela dinâmica fluvial. Esse fenômeno é uma ação que ocorre de forma natural pela deposição de sedimentos carregados pela chuva até o corpo hídrico. Tal processo se agrava com as atividades antrópicas praticadas na bacia que contribuem para a elevação das taxas de erosão resultando no assoreamento do curso d'água (VIEIRA S. et. al., 2020).



Figura 55 - Lagoa em processo de assoreamento
Fonte: Magalhães, Silva e Oliveira (2021)

O assoreamento nos corpos hídricos tem diferentes causas sobretudo por meio das ações antrópicas como o desmatamento; a degradação das áreas de preservação permanente; a ocupação desordenada; o manejo inadequado dos resíduos e/ou materiais de construção civil na bacia; a intensa movimentação de volumes de terra através da terraplenagem; a ausência de preservação da mata ciliar e retirada da cobertura vegetal e, conseqüentemente a formação dos processos erosivos no solo. Magalhães, Silva e Oliveira (2021) fizeram um levantamento das áreas localizadas à montante do Parque das Águas de Caxambu que realça as áreas prioritárias para a implantação de medidas de conservação do solo indicando a abrangência das áreas que necessitam de ações para evitar a formação de processos erosivos na bacia do ribeirão Bengo (Anexo B). Pelo mapa nota-se que há uma parcela considerável de áreas que necessitam da conservação do solo das quais se a exposição se perpetuar, continuará impactando o processo de assoreamento da lagoa do Parque.

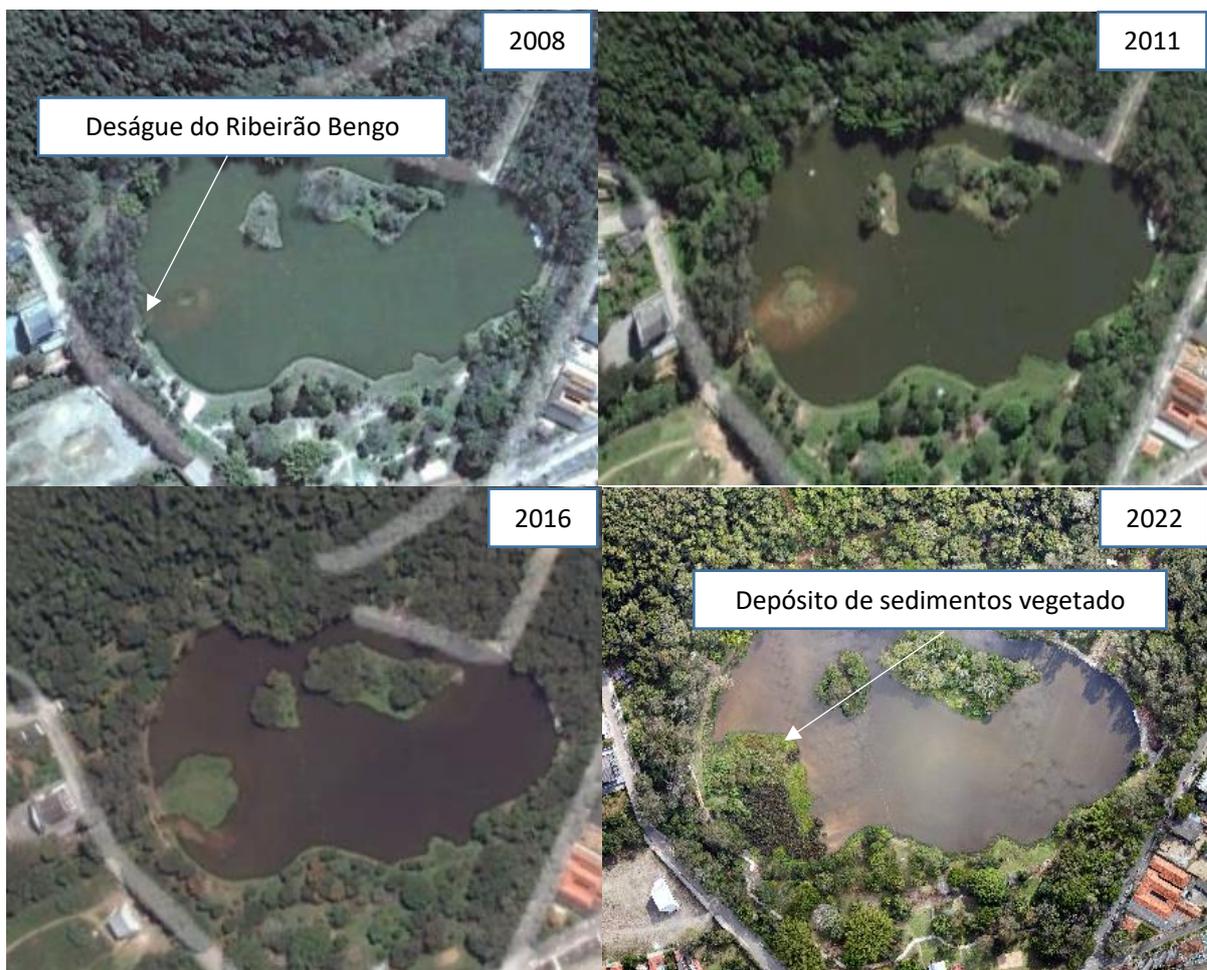


Figura 56 - Formação de ilha em decorrência do depósito natural de sedimentos na lagoa
Fonte: PMSB Caxambu (2020), DAC Engenharia (2022)

Essa movimentação e formação da deposição de sedimentos é visível no ponto de entrada das águas do ribeirão na lagoa. Nota-se o surgimento de uma ilha que atualmente está consolidada com vegetação, resultante processo de depósito natural dos sedimentos transportados pelo Ribeirão (Figura 56). Como se sabe, quanto maior o índice de assoreamento do reservatório, menor é sua capacidade de armazenamento, pois os sedimentos presentes reduzem o volume útil de detenção do reservatório resultando na redução da capacidade de retenção de água e, por consequência, em épocas de chuvas intensas induzem ao seu transbordamento. Esta condicionante ressalva a necessidade de ações para o desassoreamento do lago para prevenir a ocorrência das inundações, uma medida a ser tomada em caráter emergencial fim de evitar maiores danos e riscos.

Smith, Silva e Biagioni (2019) ressaltam que a criação de parques e a recuperação da mata ciliar são condicionantes necessárias para a redução dos episódios de enchentes e inundação provocadas por chuvas de maiores intensidades, solução esta que contribui para o sistema de drenagem urbana em contrapartida da adoção das medidas como a canalização dos cursos d'água que aceleram o processo de escoamento e conduzem o problema para a jusante.

Aparentemente, a região no entorno do Parque das Águas era área natural de várzea e enchente do Ribeirão Bengo, contudo a intensificação do processo de urbanização do município influenciou a ocupação das margens do corpo d'água (CAXAMBU, 2020). No interior do Parque das Águas, o Ribeirão é conduzido em canal aberto retangular estreito até a rua Antônio Miguel Arnaut que passa a cruzar diagonalmente a Praça Dezesesseis de Setembro no Centro. Nesse trecho é comum em picos de chuva intensa, que o canal atinja o nível máximo de sua seção (Figura 57).



Figura 57 - Canal do ribeirão no nível máximo de escoamento – R. Antônio Miguel Arnaut
Fonte: Domínio Público – imagens veiculadas na internet pela população (2022)

Após cruzar a praça, o canal segue de forma subterrânea até a Avenida Ápio Cardoso em direção à Avenida Gabriel Alves Fernandes até sua foz no Ribeirão de João Pedro, a cerca de 200 m após o Trevo da Rodovia BR-267. É comum que o trecho do canal localizado na Avenida Ápio Cardoso também atinja seu nível máximo de seção de transporte (Figura 58).



Figura 58 - Canal do ribeirão no nível máximo de escoamento – Av. Ápio Cardoso
Fonte: Caxambu (2020)

Nesse estudo, não foi analisada a capacidade de escoamento do canal, porém considerando que seu volume de água atinge os níveis de vazão máxima suportada e por vezes chegam a transbordar em alguns trechos, certamente para eventos de maiores intensidades não terá capacidade de suporte.

Não foi possível avaliar a questão do represamento do canal, porém a ocorrência da ocupação plena da calha dificultará o escoamento das águas pluviais advindas de galerias ligadas ao canal do ribeirão, o que poderá gerar os alagamentos nas ruas adjacentes ao seu curso. Para a solução dos alagamentos constantes, na região do Parque e identificados nos pontos centrais do município, será importante que sejam tomadas medidas de caráter corretivo por meio de intervenção no lago para aumentar sua capacidade de reserva possibilitando que a água que esco das galerias ligadas ao canal sejam transportadas sem interferência do volume escoado da lagoa, pois não basta aumentar a capacidade de captação das ruas, com a implantação de dispositivos de microdrenagem e rede de coleta pluvial se a jusante não possui capacidade de escoamento. Além disso, é importante que sejam realizadas a desobstrução das galerias com manutenção e limpeza preventiva regularmente, além da implantação de galerias para aumento da capacidade de escoamento.

Para estudos futuros, também é sugerido a análise da influência do represamento do canal sobre o possível efeito de remanso na rede de drenagem.

6. CONCLUSÕES

Com o presente estudo foi possível avaliar a aptidão das soluções de baixo impacto na redução dos alagamentos que ocorrem na região central do município.

A aplicação dos telhados verdes de forma isolada e a aplicação do conjunto de técnicas em determinadas sub-bacias possibilitou a análise do comportamento e eficiência dessas medidas sobre os aspectos de redução da vazão de pico, volume de escoamento e contribuição para o atraso no tempo de resposta das bacias. Compreende-se que tanto os telhados verdes isolados como as demais medidas aplicadas em conjunto possuem aptidão para a redução da vazão e do volume escoado porém, na proporção aplicada não foram capazes de influenciar positivamente o tempo de pico, antecipando sua ocorrência ainda que alcançadas vazões menores.

As técnicas LID possuem capacidade limitada de redução do escoamento devido sua capacidade do volume de armazenamento (medidas de detenção/retenção) e saturação da camada de solo (medidas de infiltração). Essa característica afeta a capacidade de retenção, incapacitando as medidas de reduzirem o escoamento após sua completa saturação. A eficiência das técnicas também estão associadas à intensidade do evento de chuva, uma vez que para chuvas mais intensas obtém-se maiores volumes pluviométricos a intensidades muito superiores à capacidade de infiltração das medidas.

Sendo assim, em função da queda da eficiência de redução do escoamento, as técnicas LID apresentam tendência de redução do volume inversamente proporcionais à intensidade da chuva. Já para a redução da vazão, a maior eficiência das técnicas está limitada a chuvas de menores intensidades, sendo aceitáveis para tempos de retorno de até 10 ou 15 anos. A eficiência das técnicas de infiltração está associada à capacidade de volume e escala de implementação. A baixa aptidão de áreas para receber LID limita o desempenho hidrológico da técnica na bacia.

Em relação à eficiência da modelagem, é necessário buscar qualidade nas informações mais precisas o quanto possível, de modo a construir modelos que retratem melhor o comportamento do sistema e minimizem as diferenças entre a simulação e as respostas dos eventos esperados. Isso é válido para todos os tipos de dados e variáveis tratados no modelo, incluindo o detalhamento do uso do solo, topografia, pluviometria, infraestrutura da rede,

características físicas da bacia, tipologia do solo, além de dados de monitoramento para a calibração e validação do modelo.

Quanto ao objetivo principal do estudo, com o baixo nível de áreas públicas disponíveis para aplicação das técnicas LID, foi necessário a adoção de áreas privadas para complementar a área de inserção dos dispositivos. A partir dos cenários simulados compreende-se que com a adoção de até 9,27% de técnicas LID haverá ganhos de redução média da vazão de pico e escoamento da bacia em 17,76% e 32,55%, respectivamente. Embora determinada eficiência, considerando os parâmetros adotados (transporte hidráulico sobre a calha da rua), essa parcela não será capaz de eliminar totalmente a lâmina d'água gerada. A captação da rede pluvial colabora para a redução da formação de áreas alagadas, porém seu escoamento pode ser prejudicado pelo comprometimento do sistema à jusante que interligado ao Ribeirão Bengo canalizado, quando funcionando em seção cheia poderá influenciar efeitos de remanso na rede interligada gerando os alagamentos na planície.

Este estudo poderá servir de base para a compreensão do comportamento e dinâmica do escoamento da bacia além de apontar de poder subsidiar informações para estudos futuros que busquem melhorar as condições de drenagem na bacia. Sugere-se para trabalhos futuros a aplicação de outras medidas de infiltração aqui não avaliadas; a determinação do tipo de solo e da capacidade de infiltração do solo existente para avaliação da aplicabilidade de medidas de infiltração locais, além do levantamento de batimetria do lago do parque e análise da influência do represamento do canal sobre o possível efeito de remanso na rede de drenagem.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A. BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.22, n.2, mar/abr, p. 239-250, 2017
- ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Manual de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas do Distrito Federal**.2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Hidroweb: séries históricas**. 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 30 nov. 2022
- AGOSTINHO, M. S. P., POLETO, C. Sistemas sustentáveis de drenagem urbana: dispositivos. **HOLOS Environment**, v.12, n.2,p.121, 2012
- ALMEIDA, G. H. T. D.; MASINI, L. S.; MALTA, L. R. S. **Hidrologia e drenagem**. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 200 p., 2017
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14114: **Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test)**, Rio de Janeiro, 2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.416: Pavimentos permeáveis de concreto**. Rio de Janeiro, 2015
- ASSUMPÇÃO, T. H.; POPESCU, J.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. Citizen observations contributing to flood modelling: opportunities and challenges. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 22, 1473–1489, 2018
- BAI, Y.; ZHAO, N.; ZHANG, R.; ZENG, X. Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas Based on SWMM. **Water**, v.11, p.33, 2019
- BARBASSA, A. P.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 91-107, abr./jun. 2014
- BECKER, N.; PINHEIRO, I. G. Potencialidades dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 11, e20180009, 2019
- BEHROUZ, M. S., ZHU, Z., MATOTT, L. S., RABIDEAU, A. J. A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM). **Journal of Hydrology**, v. 581, 124436, 2020
- BELO HORIZONTE. **Instrução técnica para elaboração de estudos e projetos de drenagem**. 2022. Disponível em:<https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-e-infraestrutura/informacoes/publicacoes/instrucao-estudos-e-projetos-de-drenagem>. Acesso em 23 mai. 2024

BRAGA, V. S.; STEFFEN, P. C.; GOMES, J. Utilização de um método de agrupamento para a regionalização de equações de chuvas intensas. In: XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021.

BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

BRITO, D. S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. 2006. Dissertação (Mestrado Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Instituto Universidade de Brasília, Brasília, 2006

CALDEIRA, Luiz Antônio Cardoso; LIMA, Diogo Pedreira. Drenagem urbana: uma revisão de literatura. **Engineering Sciences**, v. 8, n. 2, p. 1-9, 2020.

CANHOLI, Aluísio. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de textos, 2005.

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M.N.; BERTOL. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira Ci. Solo**, 22:131-140, 1998

CAXAMBU. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Econômico de Caxambu**. 117f. 2015.

CAXAMBU. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Caxambu**. Produto C - Diagnóstico.2020.

CODEMGE – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS. **Caracterização geoambiental, geológica, geofísica, hidrogeológica e hidrogeoquímica do Circuito das Águas de Minas Gerais, com ênfase nos parques hidrominerais de Caxambu, Cambuquira, Marimbeiro, Contendas e Lambari**. 50f. 1ª ed. 2018

COLLISCHON, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1, p. 336, 2013.

COSTA, J. P. M.; MENDONÇA, M. A. F. C.; MAGNO, L. As vertentes das águas minerais: um conflito ambiental em Caxambu, MG. **Novos Cadernos NAEA**, v. 22, n. 2, 2019.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde debate**, Rio De Janeiro, v. 43, n. 3, p. 94-108, 2019

CURITIBA, Manual de Drenagem Urbana de Curitiba-PR, 2002.

DARONCO, G. C.; MINUZZI, P. Drenagem urbana: trincheiras de infiltração como medida alternativa no controle do escoamento superficial causado pela urbanização em loteamentos – estudo de caso na cidade de santa rosa. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 11, 2018

DE LIMA, A.A.; NAGHETTINI, M. ALEA – Uma ferramenta prática e consistente para a análise de frequência local de eventos hidrológicos anuais. XIV SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2001.

DINIZ, G. J. S. **Desempenho de técnicas compensatórias na mitigação do perigo de inundações em uma bacia urbanizada fechada**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula das 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FARIA, M. T. S.; PEREIRA, L. M. S.; DIAS, A. P.; GOMES, U. A. F.; MOURA, P. Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico e Planos Diretores de Drenagem Urbana em municípios de pequeno porte de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.27, n.1, pp. 185-193, jan-fev, 2022.

FAVA, M. C., ABE, N., RESTREPO-ESTRADA, C., KIMURA, B. Y., MENDIONDO, E. M. Flood modelling using synthesised citizen science urban streamflow observations. **Journal of Flood Risk Management**, 12(S2), e12498, 2018

FAVA, M. C. F.; MACEDO, M. B. M.; BUARQUE, A. C. S.; SARAIVA, A. M. DELBEM, A. C. B. MENDIONDO, E. M. Linking Urban Floods to Citizen Science and Low Impact Development in Poorly Gauged Basins under Climate Changes for Dynamic Resilience Evaluation. **Water**, v. 14, pp. 1467, 2022

FILENI, F. M.; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. M. aplicação de LIDs na região do Cerrado para mitigação de áreas alagadas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 24, e40, 2019

FAN, G.; LIN, R.; WEI, Z.; XIAO, Y.; SHAGGUAN, H.; SONG, Y. Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control. **Science of The Total Environment**, v. 805, p. 150404, 2022.

FERRANS, P. et al. Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150447, 2022.

FORMIGA, K. T. M., CARVALHO, M. D., PEREIRA, T., SOARES, A. K. (2016). Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária**, v. 21, n. 4, 697-707.

FRIAS, R. A.; MANQUIZ-REDILLAS, M. Modelling the applicability of Low Impact Development (LID) technologies in a university campus in the Philippines using Storm Water Management Model (SWMM). In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012009.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Cadernos temáticos saneamento básico: Drenagem urbana e manejo de águas pluviais**. 23 f.

GARCIA, J. B.; PAIVA, E. M. C. Comparação das respostas do modelo SWMM para diferentes amplitudes de cheia. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1, 2004, Santa Maria: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004.

GIRONÁS, J.; ROESNER, L.A.; DAVIS, J. Storm water management model: applications manual. Fort Collins: U.S. Environmental Protection Agency, Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University, 2009.

GUIMARÃES, R. C. **Probabilidade e estatística aplicada à hidrologia**. 2011. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4729/1/Probabilidade%20e%20Estat%C3%ADstica%20aplicada%20%C3%A0%20Hidrologia.pdf>. Acesso em 10 fev. 2023

HANNES, E.; BONDAR, C. Infraestrutura verde para o bairro do Mandaqui: possibilidade ou utopia?. **Revista LABVERDE**. 2015.

HASAN, H. H.; RAZALI, S. F. M.; ZAKI, A. Z. I. A. HAMZAH, F. M. . Integrated Hydrological-Hydraulic Model for Flood Simulation in Tropical Urban Catchment. **Sustainability**, v. 11, pp. 6700, 2019

HUA, P.; YANG, W.; QI, X.; JIANG, S.; XIE, J.; GU, X.; LI, H.; ZHANG, J.; KREBS, P. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. **Journal of cleaner production**, v. 242, p. 118515, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Caxambu**. [s.d.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/caxambu/panorama>. Acesso em 25 jan. 2023

JÚNIOR, J. M. S.; PAZ, I. S. R.; REIS, M. M.; Modelagem hidrológica de sistema de drenagem de loteamento com implantação de telhado verde. In: XXIV **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Anais... Aracaju-SE ABRH, 2023

KUMAR, S.; GUNTU, R. K.; AGARWAK, A.; VILLURI, V. G. K.; PASUPULETI, S.; KAUSHAL, D. R.; GOSIAN, A. K.; BRONSTERT, A. Multi-objective optimization for stormwater management by green-roofs and infiltration trenches to reduce urban flooding in central Delhi. **Journal of hidrology**, 606 (2022), 127455

LAPPICY, T.; COSTA, M. E.; KOIDE, S. Uso do SWMM para modelagem de cenários em uma lagoa de retenção e uma área de expansão. Encontro Nacional de Águas Urbanas, 13, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020.

LECHI, D.O.; SILVA, D. P. **Análise do emprego de técnicas compensatórias lineares em drenagem: estudo de caso na região da rodoviária do município de Aracruz/ES**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Infraestrutura Urbana). Instituto Federal do Espírito Santo. 10 p. 2021

LEMO, T. D. P. **Simulações temporais e estruturantes para o desempenho da drenagem urbana em microbacia de município de grande porte**. Trabalho Final de Graduação (Engenharia Civil). Universidade Federal Rural do Semiárido. 86 p. 2021

LOURENÇO, Rossana Ramos de Abreu. **Sistemas urbanos de drenagem sustentáveis**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2014

MAGALHÃES, K. I.; SILVA, F. B.; DE OLIVEIRA, A. S. Zoneamento de áreas vulneráveis a perda de solo na sub bacia hidrográfica à montante do parque das Águas de Caxambu (MG). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 3, p. 185-199, 2022.

MAIA, D. C. PITTON, S. C. E. Caracterização das enchentes na área urbana de Ribeirão Preto (SP): um enfoque através das notícias de jornal. **Geografia**, Rio Claro, v. 34, n. 2, p. 307-327, mai./ago. 2009

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. Infraestruturas sustentáveis no Brasil: oportunidades para o saneamento e políticas urbanas. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 25, pp. 27-38, jan-jun, 2021.

MINAS GERAIS, Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais: Legenda Expandida**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010

MORELLI, D. R. T.; BARBASSA, A. P. Planejamento urbano com técnicas de desenvolvimento de baixo impacto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. Sumários. Viamão: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

MOURA, P. M.; BARRAUD, S.; BAPTISTA, M. B. O funcionamento dos sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais. Campo Grande – MS: ABRH, 2009

MOURA, N. C. B. **Biorretenção -Tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva**. Tese (Doutorado em arquitetura). Universidade de São Paulo. 299 p., 2013

MOURA, E. F. S.; SILVA, S. R. S. Study waterproofing soil and proposals for technical level of sustainable urban drainage area in Recife-PE. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 03, n. 15, 2015, pp. 78-93

MONAT, Dr. H. **Caxambu**. Rio de Janeiro: Indiana University Library, 1984

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p

NETO, E. G. C.; ALMEIDA, A. K.; LEITE, I. R.; GUARIENTI, J. A.; ALMEIDA, I. K. Telhado Verde: alternativa sustentável para a drenagem do escoamento superficial. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v.7, n.2, p.125-136, abr., 2021

PAITHANKAR, D. N.; TAJI, S. G. Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model. **Materials today: proceedings**, v. 32, p. 943-950, 2020.

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

PAULA, J. S.; SILVA, J. S.; OLIVEIRA, M. A. F.; RANGEL, M.P. Execução de obras de drenagem pluvial: princípios empregados na construção de redes de drenagem urbana. **Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**, n. 2, vol. 3, 2022

PEDROSA, R.A.; OLIVEIRA, A. D. F.; FERREIRA, D. S. F.; FREIRE, L. S.; BUENO, P. H. C.; SOUSA, M. C. B.; IWATA, B. F. Plano diretor de drenagem urbana no contexto do planejamento urbano. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, Volume 2, Número 2, p. 245 –261, jan-jun, 2021.

PENG, Z., JINYAN, K., WENBIN, P., XIN, Z. E YUANBIN, C. Efeitos do desenvolvimento de baixo impacto no escoamento das chuvas urbanas sob diferentes características das chuvas. **Revista Polonesa de Estudos Ambientais**, v.28, n. 2, pp.771-783, 2019.

PEREIRA, H. L.; CATALUNHA, M. J.; JÚNIOR, C. R. B.; SOUSA, P. T. G. Qualidade de modelos digitais de elevação utilizando dados do SIGEF: Estudo de caso para as sub-bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho no estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.01, p.187-200, 2019

PEREIRA, M. C. S.; GOBATTI, L.; SOARES, M. C.; LEITE, B. C. C.; MARTINS, J. R. S. Soluções baseadas na natureza: quadro da ocupação da cidade de São Paulo por células de biorretenção. *Revista LABVERDE. FAUUSP. São Paulo*, v. 11, n. 01, e189292, 2021

RIBEIRO, L. C.; NUNES, A. L. Controle de escoamento superficial em uma bacia urbana com a utilização de telhado verde. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.10, p.77297-77306, 2020

ROCHA, L. L. L.; RIBEIRO, R. J. C. Reservatórios de retenção e infiltração de águas pluviais: uma análise sob a ótica urbana. Estudo de caso da cidade de Natal/RN. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Paranoá, 2018

ROCHA, M. J. D.; PEREIRA, S. P.; NETO, I. E. L. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.26 n.3, p. 451-459, mai-jun, 2021

RODRIGUES, G.C., JÚNIOR, M.A.S. Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.26, n.2, mar-abr, p. 231-237, 2021

RODRIGUEZ, C. A. M.; TEIXEIRA, B. A. N. Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.26, n.1, jan/fev, p. 143-150, 2021

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model: user's manual version 5.0**. 2010

ROSSMAN, L. A., SIMON, L. A. **Storm Water Management Model: user's manual version 5.2**. 2022

SABINO, M.; DE SOUZA, A. P.; ULIANA, E. M.; DE ALMEIDA, F. T.; LISBOA, L.; ZOLIN, C. A. Distribuições de probabilidade para intensidade de precipitação máxima no estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, jul/dez, 2021

SANTOS, G. A.S.; SILVA, B. C.; SANTOS, I. F. S.; SANTOS, G. S. Evolução da gestão do sistema de drenagem urbana: da fase pré-higienista à aplicação da modelagem computacional integrada às técnicas de baixo impacto. In: CONGRESSO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 20, 2023, Poços de Caldas –MG. **Anais...** Poços de Caldas: Instituto Federal do Sul de Minas Gerais, 2023

SANTOS, P.T.S.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 161-174, jan./mar. 2013

SANTOS, R. A. Cálculo da chuva intensa pelo método das Isozonas para cidades do estado da Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 19, n. 2, mai-ago. 2015, p. 1334-1343

- SASAKI, J. K.; BRITO, H. C.; VIEIRA, E. M. S.; FILHO, M. N. M.. Seleção de Áreas Prioritárias para Instalação de Medidas de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: O Caso do Bairro de Bodocongó em Campina Grande, PB. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.
- SILVA, L. H.; FILHO, F. C. M. M.; RODRIGUES, A. L. M.; MORAIS, E. B. Sistemas de biorretenção para o manejo das águas pluviais: panorama internacional e critérios para projeto. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e69591110335, 2020
- SILVA, S. T. B.; NETO, C. O. A.; INGUNZA, D. M. P. D. Potencialidade de uso não potável de água de lagoa de retenção. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 24, n. 05, set-out, 2019
- SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 10, n. 1, jan-mar, 2005
- SMITH, W. S.; SILVA, F. L.; BIAGIONI, R. C. River dredging: when the public power ignores the causes, biodiversity and Science. **Ambiente & Sociedade**, v. 22, n. e00571, 2019
- SONG, Jae-Yeol; CHUNG, Eun-Sung; KIM, S. H. Decision Support System for the Design and Planning of Low-Impact Development Practices: The Case of Seoul. **Water**, v. 10, p.146, 2018.
- TAVARES, T. G. A.; SILVA, D. F.; GOLDENFUM, J. A.; DORNELLES, F. Impactos das mudanças climáticas no município de São Leopoldo: parte 2: sistema urbano de águas pluviais. In: **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Anais [recurso eletrônico]. Belo Horizonte-MG: ABRH, 2021
- TEJADAS, B. E.; POSSANTI, I. B.; MARQUES, G. Simulação de tecnologias LID em lotes urbanos para controle de escoamento superficial. In: **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Anais. Foz do Iguaçu – PR: ABRH, 2019
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. L. **Drenagem urbana**. 1995.
- TUCCI, C. E. M.; Ministério das Cidades; Global Water Partnership; Wolrd Bank; Unesco. **Gestão de Águas Pluviais Urbana**. 270 p., 2005
- USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model – User’s manual Version 5.1. *U.S.A*: 2015.
- VERGUTZ, Laila Atyna Alves; PEREIRA, Carlos Eugênio; SCHMIDT, Marcio Augusto Reolon. Análise da implantação de reservatórios de retenção de forma que sejam minimizados os impactos causados por inundações. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 1267-1277, 2019.
- VIANA, V. J.; MORAES, L. L. Contribuições potenciais dos jardins de chuva para a redução de riscos de alagamentos. In: **II ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES**, 2020.
- VIEIRA S., Y.S.; STANTON, N. S. G.; VILLENA, H. H.; REBOUÇAS, R.C. Impacto antrópico no processo de assoreamento da enseada da Japuíba, Angra dos Reis (RJ), São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 39, n. 2, p. 481 - 491, 2020
- WANG, Y.; CHEN, A. S.; FU, G.; DJORDJEVIĆ, S.; ZHANG, C.; SAVIĆ, D. A. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering

multipleninformation sources and urban features, **Environmental Modelling & Software**, v. 107, pp. 85-95, 2018

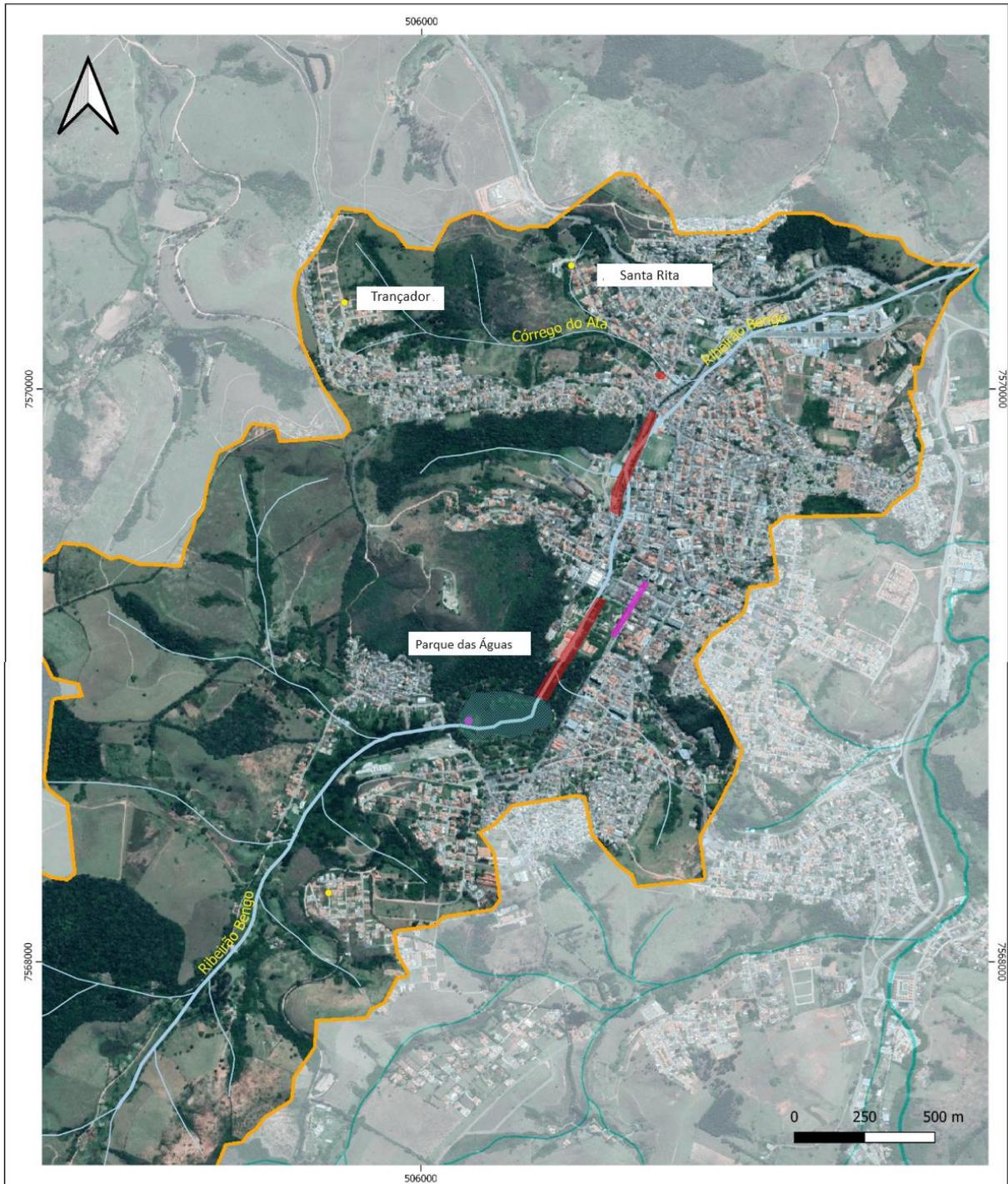
YIN, D.; EVANS, B.; WANG, Q.; CHEN, Z.; JIA, H.; CHEN, A. S.; FU, G.; AHMAD, S. LENG, L. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. **Science of the Total Environment**, v. 720, p.137630, 2020

ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A. L. L. da. Uso de técnicas de Low Impact Development no controle de impactos hidrológicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1195-1208, nov-dez, 2019

ZHU, H.; YU, M.; ZHU, J.; LU, J., CAO, R. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff, **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 8, n. 4, pp. 373-382, 2019

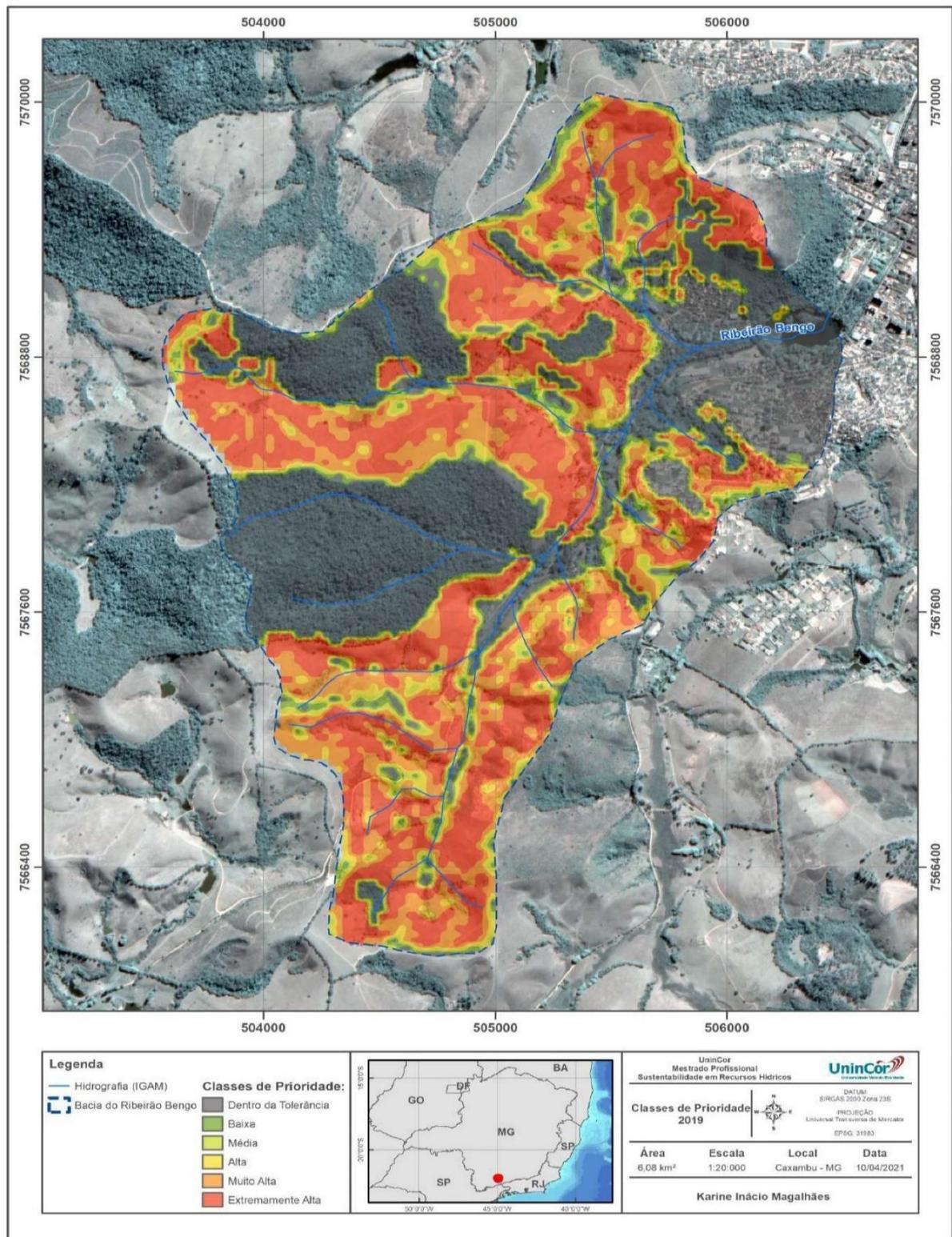
Zhu Z, Chen X. Evaluating the Effects of Low Impact Development Practices on Urban Flooding under Different Rainfall Intensities. **Water**. v. 9, n.7, 2017.

ANEXO A - Bacia do ribeirão bengo



Fonte: PM Caxambu (2021)

ANEXO B - Áreas prioritárias para conservação do solo



Fonte: Magalhães, Silva e Oliveira (2021)