

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
HÍDRICA

**Avaliação dos parâmetros de terreno para proposta de vazão de
lote unitária: Estudo de caso no município de Itajubá/MG**

Júlio Eduardo de Oliveira Rocha

ITAJUBÁ, MARÇO DE 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
HÍDRICA

Júlio Eduardo de Oliveira Rocha

**Avaliação dos parâmetros de terreno para proposta de vazão de
lote unitária: Estudo de caso no município de Itajubá/MG**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica.

Área de Concentração: Gestão de Recursos Hídricos

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Moni Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Marina Batalini de Macedo

MARÇO DE 2025

ITAJUBÁ

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por iluminar meu caminho, me dar força, saúde e coragem para seguir em frente e conquistar meus objetivos.

À minha família que sempre esteve ao meu lado. Em especial, à minha mãe, Lúcia, e às minhas irmãs, Carina e Carol, pelo amor incondicional, o apoio incansável e os momentos de leveza.

Às professoras Ana Paula Moni e Marina Batalini, que, com muita paciência e disposição, me orientaram na execução deste trabalho do qual tanto me orgulho. Agradeço por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pelo incentivo.

Às minhas amigas Sabrina e Lúcia, com quem tive o privilégio de compartilhar essa caminhada acadêmica e que, além de se tornarem grandes amigas, foram minha rede de apoio e incentivo durante os anos de mestrado.

Ao meu amigo Lucas, que, além de ser uma referência profissional e técnica, me apoiou e incentivou imensamente durante a finalização deste trabalho. À minha amiga Laís, com quem diariamente compartilhei minhas dificuldades e que tanto torceu por mim.

Ao Luis, por não me deixar desanimar e sempre se mostrar presente em todos os momentos. Sua presença fez toda a diferença.

A Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI por me proporcionar um ensino de qualidade e contribuir para a minha formação e crescimento profissional desde a graduação.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a finalização deste trabalho, meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Os alagamentos e as inundações são frequentes em muitos municípios brasileiros, devido principalmente ao crescimento desordenado das cidades e à mudança no uso e ocupação do solo. Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a sensibilidade da declividade do terreno e da urbanização, representada pelo parâmetro *Curve Number* (CN), na geração do escoamento superficial e propor uma vazão a ser retida por área de lote para diferentes cenários em um loteamento no município de Itajubá/MG. Para isso, foi realizada a modelagem hidrológica da área de drenagem do loteamento, inserida na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, a partir do Modelo de Gestão de Drenagem Urbana SWMM (*Storm Water Management Model*). A princípio, procedeu-se a delimitação e a caracterização da área em relação aos seus aspectos físicos e hidrológicos, para, em seguida, elaborar-se o estudo de chuvas intensas na região. A chuva de projeto foi obtida a partir da desagregação da precipitação em quantis sub-diários e da discretização temporal pelo método de Huff, para se obter a chuva de projeto para Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos. Em relação à modelagem hidrológica, foi definida a duração de 10 minutos para a chuva de projeto, enquanto a estimativa do escoamento superficial foi realizada pelo método de infiltração CN-SCS e o transporte hidráulico pelo modelo da Onda Cinemática. Inicialmente, foi simulado no SWMM o cenário 0, de pré-urbanização, considerando-se a declividade e os parâmetros do solo originais do terreno. Os demais cenários simulados foram: cenário 1 com CN 80, cenário 2 com CN 85, cenário 3 com CN 90 e cenário 4 com CN 95, para cada sub-bacia urbanizada. Em cada cenário, as declividades médias das sub-bacias urbanizadas foram diminuídas, gradativamente, em 5% a partir da declividade média original. Logo, cada cenário foi subdividido conforme o relevo, categorizados em, predominantemente forte ondulado (20-45%), ondulado (8-20%), suave ondulado (3-8%) e plano (0-3%). A vazão obtida no cenário de pré-urbanização serviu de referência para o cálculo da vazão por área a ser retida pelos lotes nos cenários urbanizados, de modo que a vazão no exutório não exceda a vazão natural. Assim, foi possível traçar ábacos que relacionam o parâmetro CN, a declividade e as vazões a serem retidas para cada tempo de retorno avaliado, os quais servem como ferramenta para balizar o processo de urbanização na área de estudo e o controle das águas dispostas nos cursos d'água naturais. Para o cenário de pré-urbanização foi encontrada uma vazão no exutório de 0,09m³/s, 0,15m³/s e 0,24m³/s para cada Tempo de Retorno avaliado. Nos cenários urbanizados, as vazões no exutório apresentaram crescimento expressivo, sendo 3,11m³/s, 3,20 m³/s e 3,36 m³/s para o máximo valor de CN e de declividade. Assim, as vazões a serem retidas por área foram de 0,30m³/(s.ha), 0,31m³/(s.ha) e 0,32m³/(s.ha). Por fim, foi possível observar que o processo de urbanização, representado pelo parâmetro CN, possui grande sensibilidade na vazão gerada no exutório da bacia hidrográfica, ao passo que a declividade se mostrou mais sensível para o valor de CN igual a 85.

Palavras-Chave: Drenagem Urbana, Modelagem Hidrológica, Vazão de Lote.

ABSTRACT

Flooding and inundations are frequent in many Brazilian municipalities, due mainly to uncontrolled urban growth and change in land use. Therefore, this study aims to evaluate the sensitivity of terrain slope and urbanization, represented by the Curve Number (CN) parameter, in runoff generation. Also, it aims to propose a discharge value to be retained by each lot in different scenarios in an allotment in the municipality of Itajubá/MG. To achieve this, hydrological modelling was performed in the allotment drainage area, which is part of the Ribeirão José Pereira basin, using the Storm Water Management Model (SWMM). At first, the physical and hydrological characteristics of the drainage area were delineated and analyzed, followed by the intense rainfall determination study. The design rainfall was obtained through precipitation disaggregation into sub-daily quantiles and temporal discretization using the Huff method, to obtain design rainfall for 5-, 10- and 25-year Return Periods. Regarding the hydrological modelling, a 10-minute duration rainfall was defined, while the runoff estimation was defined by the CN-SCS infiltration method and the hydraulic transport by the Kinetic Wave model. Initially, a scenario 0, representing pre-urbanization conditions, was simulated in SWMM, considering the original terrain slope and land use parameters. The other simulated scenarios were: scenario 1 with CN equal to 80, scenario 2 with CN equal to 85, scenario 3 with CN equal to 90 and scenario 4, with CN equal to 95, to each urbanized sub-basin. In each scenario, the average slope of urbanized sub-basins was reduced, gradually, 5% from the original slope. Therefore, each scenario was further sub-divided according to slope categories: predominantly strongly rolling (20-45%), rolling (8-20%), gently rolling (3-8%) and flat (0-3%). The discharge obtained in the pre-urbanization scenario served as the baseline to calculate the discharge by unit area to be retained by lots in the urbanized scenarios, ensuring that the discharge in the outlet does not exceed natural discharge. As a result, it was possible to develop abacuses that relate the CN parameter, slope and the discharge value to be retained in the lots for each analyzed Return Period, and the control of water discharged to natural water bodies. To the pre-urbanization scenario, the discharge in outlet calculated was 0,09m³/s, 0,15m³/s and 0,24m³/s to each Return Period analyzed. In urbanized scenarios, the outlet discharges were significantly greater, with values of 3,11m³/s, 3,20m³/s and 3,36m³/s for the maximum CN and slope values. Therefore, the discharge values to be retained by area are 0,30m³/(s.ha), 0,31m³/(s.ha) and 0,32m³/(s.ha). Finally, it was possible to conclude that the urbanization process, represented by the CN parameter, has a great sensitivity in the discharge generated in the watershed outlet, whereas terrain slope was more sensitive to CN equal to 85.

Keywords: Urban Drainage, Hydrological Modelling, Lot Discharge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Modificações no hidrograma de cheias impostas pelo processo de urbanização.	16
Figura 3.2 – Características dos leitos dos rios	17
Figura 3.3 – Comparativo entre as visões higienista e conservacionista.....	19
Figura 3.4 – Visão integrada dos sistemas de águas urbanas	21
Figura 3.5 – Visão conceitual do fenômeno de escoamento do SWMM	35
Figura 3.6 – Metodologia para elaboração da revisão bibliométrica	39
Figura 3.7 – Produção de documentos por ano	41
Figura 3.8 – Produção de documentos por país.....	41
Figura 3.9 – Tipos de documentos produzidos.....	42
Figura 3.10 – Mapa de colaboração entre os países	42
Figura 4.1 - Fluxograma da sequência metodológica adotada no estudo	44
Figura 4.2 – Localização da área de estudo.....	45
Figura 4.3 – Representação das áreas da região de estudo.....	46
Figura 4.4 – Cenários avaliados	52
Figura 4.5 - Localização dos postos pluviométricos	55
Figura 4.6 - Chuvas médias mensais em Itajubá - Estação Pluviométrica São João de Itajubá (2245083).....	56
Figura 4.7 – Distribuição de frequências para precipitação máxima	58
Figura 4.8 – Mapa de isozonas	59
Figura 4.9 – Gráfico referente ao 1º quartil de Huff.....	61
Figura 4.10 – Sub-bacias da área de estudo para o cenário 0.....	62
Figura 4.11 – Sub-bacias da área de estudo para os cenários 1, 2, 3 e 4.....	63
Figura 4.12 – Declividade da área de estudo.....	65
Figura 4.13 – Formato irregular de sub-bacia natural para cálculo de largura.....	68
Figura 4.14 – Representação da sub-bacia	69
Figura 4.15 – Representação dos nós na modelagem hidrológica.....	70
Figura 4.16 – Representação da cota do radier e profundidade máxima de um poço de visita	71
Figura 4.17 – Representação dos condutos na modelagem hidrológica.....	72
Figura 4.18 – Representação do <i>offset</i> para o nó.....	73
Figura 5.1 - Hidrografia do município de Itajubá.....	75
Figura 5.2 - Pedologia do município de Itajubá	76
Figura 5.3 - Área de contribuição e talvegue principal	78

Figura 5.4 – Hietograma típico para o 1º quartil de Huff para Tempos de Retorno de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 anos	79
Figura 5.5 – Representação gráfica dos cenários simulados no SWMM	80
Figura 5.6 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 0 para Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos.....	86
Figura 5.7 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 5 anos	87
Figura 5.8 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 10 anos	87
Figura 5.9 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 25 anos	88
Figura 5.10 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 5 anos	89
Figura 5.11 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 10 anos	89
Figura 5.12 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 25 anos	90
Figura 5.13 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 5 anos	91
Figura 5.14 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 10 anos	91
Figura 5.15 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 25 anos	92
Figura 5.16 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 5 anos	93
Figura 5.17 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 10 anos	93
Figura 5.18 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 25 anos	94
Figura 5.19 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 5 anos	97
Figura 5.20 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 10 anos	98

Figura 5.21 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 25 anos99

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Categorias de medidas estruturais	22
Quadro 3.2 – Categorias de medidas não estruturais	23
Quadro 3.3 – Espaço de gestão das águas urbanas.....	23
Quadro 3.4 – Distribuição dos desastres relacionados a problemas de drenagem no período de 2013 a 2016, por número de municípios atingidos e tipo de área atingida.....	29
Quadro 3.5 – Modelos Hidrológicos aplicados a drenagem urbana.....	32
Quadro 3.6 – Módulos descritores do ambiente para representação	33
Quadro 4.1 – Grupo hidrológico dos solos.....	49
Quadro 4.2 – Distribuição das classes de declividade.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Municípios com drenagem urbana, por existência de instrumentos reguladores, segundo as grandes regiões	25
Tabela 3.2 – <i>Strings</i> inseridas nas plataformas <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i>	40
Tabela 4.1 – Quadro de áreas para a sub-bacia na qual o loteamento está inserido.....	46
Tabela 4.2 – Valores de CN em função da cobertura do solo e do tipo hidrológico de solo para a condição de umidade II	50
Tabela 4.3 – Fórmulas de TC recomendadas para bacias hidrográficas urbanas	51
Tabela 4.4 – Postos pluviométricos identificados	55
Tabela 4.5 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas	60
Tabela 4.6 – Sub-bacia do cenário 0.....	63
Tabela 4.7 – Sub-bacias dos cenários 1, 2, 3 e 4	64
Tabela 4.8 – Declividade média da sub-bacia do cenário 0	65
Tabela 4.9 – Declividade média das sub-bacias dos cenários 1, 2, 3 e 4	66
Tabela 4.10 – Coeficiente n de Manning para escoamento em superfícies.....	66
Tabela 4.11 – Profundidade do armazenamento em depressão para áreas permeáveis	69
Tabela 4.12 – Coeficiente n de <i>Manning</i> para condutos fechados	73
Tabela 5.1 – Dados do SNIS referente à Infraestrutura para Itajubá.....	76
Tabela 5.2 – Dados do SNIS referente à Gestão de Riscos para Itajubá.....	77
Tabela 5.3 – Tempos de concentração calculados.....	78
Tabela 5.4 – Quantis de chuva obtidos.....	79
Tabela 5.5 – Dados de entrada da sub-bacia para o cenário 0.....	81
Tabela 5.6 – Dados de entrada da sub-bacia para os cenários 1, 2, 3 e 4.....	81
Tabela 5.7 – Indicação dos Poços de Visita (PV) do destino do escoamento superficial de cada sub-bacia	82
Tabela 5.8 – Valores de CN e A. I. (%) para os cenários 1, 2, 3 e 4.....	82
Tabela 5.9 – Valores de declividade e profundidades dos armazenamentos em depressão para as áreas impermeáveis	84
Tabela 5.10 – Dados de entrada para os nós.....	85
Tabela 5.11 – Dados de entrada para os condutos.....	85
Tabela 5.12 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 5 anos	94
Tabela 5.13 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 10 anos	95
Tabela 5.14 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 25 anos	96

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1. O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	15
3.2. PLANEJAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUAS PLUVIAIS.....	17
3.3. CENÁRIO ATUAL DA DRENAGEM URBANA.....	28
3.4. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	30
3.5. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	39
4. METODOLOGIA	44
4.1. DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.2. DIAGNÓSTICO DA DRENAGEM URBANA NO MUNICÍPIO	47
4.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO.....	49
4.4. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS	51
4.5. ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS	54
4.6. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	61
4.7. VAZÃO RETIDA POR LOTE.....	74
5. RESULTADOS	75
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	75
5.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO.....	77
5.3. CHUVA DE PROJETO.....	79
5.4. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NO SWMM	80
5.5. CENÁRIOS SIMULADOS.....	86
5.6. VAZÃO DE LOTE UNITÁRIA	94
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE A – CHUVAS MÁXIMAS E FALHAS PLUVIOMÉTRICAS.....	109
ANEXO 1 - PLANTA DE DRENAGEM PLUVIAL.....	111

1. INTRODUÇÃO

Os alagamentos e as inundações são realidade nos municípios brasileiros, devido a precariedade do saneamento básico, principalmente no que diz respeito à drenagem urbana e a gestão de águas pluviais. Aliado a isso, o crescimento desordenado e sem planejamento dos centros urbanos, ocasionado principalmente pelo processo de industrialização a partir da década de 1930, contribuiu para a maximização do problema.

Frente a esse cenário de urbanização crescente, as características naturais das bacias hidrográficas são modificadas, e conseqüentemente, há a alteração dos componentes do ciclo hidrológico natural, causado principalmente pela pavimentação impermeável e a execução de condutos artificiais para escoamento das águas pluviais (Righetto, 2009). Dessa forma, os prejuízos à sociedade são notáveis, como a redução da infiltração no solo e dos níveis dos lençóis freáticos, a diminuição da evapotranspiração, o aumento da poluição difusa e contaminação do ambiente, além do aumento das vazões máximas de escoamento ao longo do tempo (DEP, 2015).

Uma forma de amenizar esses impactos, é conhecer o comportamento dos processos hidrológicos das bacias hidrográficas urbanas, como a precipitação, as fontes geradoras de escoamento superficial, a infiltração e as possibilidades de armazenamento. Assim, os Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU) ganham notoriedade nos municípios brasileiros, frente a crescente valorização do conceito de sustentabilidade ambiental e a necessidade de aumentar a segurança contra eventos hidrológicos extremos (SMDU, 2012). Frente a isso, é necessário um planejamento multidisciplinar, para que ocorra o devido controle da urbanização de áreas sujeitas a riscos e inundações e a correta orientação quanto ao uso e ocupação do solo dos municípios brasileiros.

Uma ferramenta aliada a esse objetivo são os modelos hidrológicos computacionais e matemáticos capazes de avaliar o escoamento superficial e as vazões de projeto em sistemas de drenagem, além de contribuírem para a tomada de decisões e a elaboração dos Planos Diretores. É de extrema importância o entendimento do funcionamento dos métodos e parâmetros disponíveis nos modelos, bem como as suas limitações e aplicabilidades para garantir os resultados apropriados e condizentes com a realidade da área de estudo considerada.

Nesse contexto, o presente trabalho busca representar a modelagem hidrológica de um loteamento residencial no município de Itajubá, Minas Gerais. Para isso, foi utilizado o modelo de gestão de drenagem urbana SWMM (*Storm Water Management Model*), a fim de avaliar a

sensibilidade da declividade e da urbanização, representada pelo parâmetro CN, na geração final do escoamento superficial em um loteamento, de modo a sugerir uma vazão a ser retida por área de lote como medida de gestão de águas pluviais urbanas

O presente trabalho foi estruturado com as seguintes seções: apresentação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa, seguido de uma breve fundamentação teórica sobre o assunto com a apresentação do modelo hidrológico utilizado e a abordagem de trabalhos científicos produzidos por demais autores que utilizaram a mesma ferramenta. Ainda nessa seção, é apresentada a revisão bibliométrica da drenagem urbana, com o objetivo de analisar e sistematizar o panorama das produções científicas do tema, por meio de técnicas quantitativas e qualitativas. Posteriormente, é apresentada a metodologia definida em cada etapa do estudo, seguido dos resultados obtidos e as considerações finais.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal:

- Avaliar a sensibilidade da declividade e da urbanização, representada pelo parâmetro CN, na geração do escoamento superficial em um loteamento, de modo a sugerir uma vazão a ser retida por área de lote como medida de gestão de águas pluviais urbanas em diferentes cenários.

Além disso, tem-se como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliométrica e bibliográfica sistemática para identificação das principais lacunas no estudo de águas pluviais urbanas;
- Realizar a modelagem hidrológica da sub-bacia representativa do loteamento Cidade Nova, localizada no município de Itajubá – MG, a partir do modelo SWMM (*Storm Water Management Model*);
- Realizar uma análise de sensibilidade do parâmetro declividade e da urbanização da sub-bacia hidrográfica;
- Sugerir uma vazão a ser retida por área de lote em função da declividade e da urbanização para a gestão adequada das águas pluviais urbanas no município em estudo, através de ábacos que relacionam a declividade, vazão e parâmetro CN para diferentes Tempos de Retorno.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. O processo de urbanização ao longo do tempo

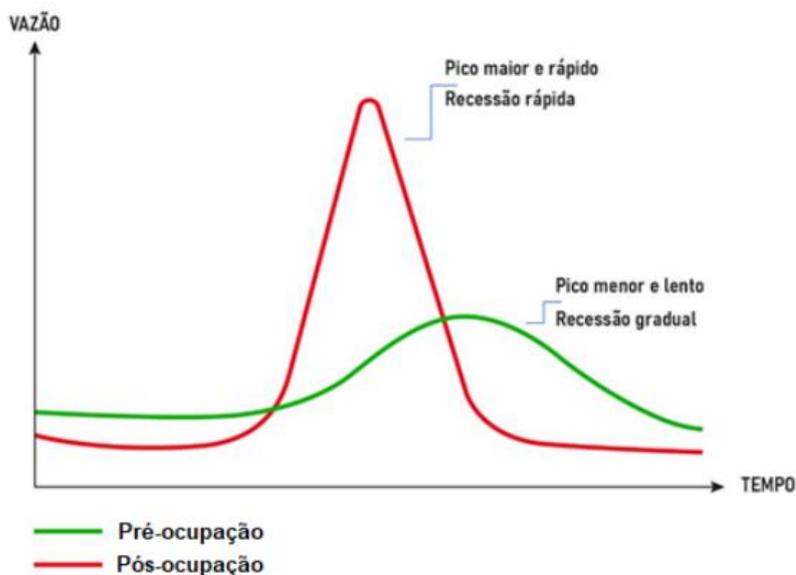
O processo de urbanização nos países desenvolvidos teve início no século XVIII com o advento da industrialização e o conseqüente êxodo rural. No Brasil, esse processo teve início em meados do Século XX, a partir do processo de modernização dos meios de produção e o aumento do protagonismo das cidades nas relações sociais (Collodel, 2019). Baseado nesse modelo de desenvolvimento, Silva *et. al.* (2016) destacam a crescente demanda por recursos naturais e espaço físico nas cidades, e áreas que deveriam servir como suporte à preservação ambiental, como as margens de córregos e rios, passam a serem ocupadas de forma desordenada.

Nesse sentido, a ausência de planejamento devido a acelerada expansão urbana, aliada com a concentração da população em pequenos espaços, apresentou significativo impacto nos ecossistemas terrestre, aquático e na própria população com doenças veiculadas a água, inundações, despejo de efluentes sanitários nos corpos hídricos, deslizamentos de terra e, conseqüentemente, a perda de qualidade de vida (Tucci, 2005). Baptista e Cardoso (2013), destacam que as respostas dos sistemas fluviais urbanos, frente a concentração da população em cidades e a densificação populacional em grandes metrópoles, vieram por meio de um ambiente pontuado pela frequente ocupação de áreas de risco por habitações subnormais, dos prejuízos ambientais e danos socioeconômicos severos, os quais colocam em questão os modelos de urbanização e sanitários vigentes.

Assim, a urbanização decorrente de um país onde 80% da população brasileira vive em cidades (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019), foi responsável por transformar as superfícies naturais dos solos e intensificar a sua impermeabilização, o que fez reduzir a rugosidade dos terrenos urbanos, e conseqüentemente, diminuir a infiltração de água e aumentar o escoamento superficial. Essas mudanças alteram tanto o volume quanto as direções dos fluxos superficiais da água da chuva, além de favorecerem o aumento do transporte de sedimentos, a poluição difusa e a contaminação ambiental (DGAU, 2022).

Nesse contexto, o pico das vazões dos hidrogramas de cheia das bacias hidrográficas urbanizadas tende a ser mais acentuado e seu tempo de resposta reduzido, quando comparado com os hidrogramas das bacias hidrográficas em seu estado natural, conforme Figura 3.1 (DGAU, 2022).

Figura 3.1 – Modificações no hidrograma de cheias impostas pelo processo de urbanização



Fonte: DGAU (2022)

A reorganização da cobertura do solo e o processo de urbanização podem ser planejados de forma sustentável, ao considerar os impactos potenciais e propor medidas de controle e mitigação dos efeitos antes citados. Ferramenta aliada a isso, são as chamadas medidas de controle na fonte, que consistem na implementação de ações mitigadoras diretamente nas áreas onde o escoamento superficial se origina, prevenindo que o aumento do fluxo causado pela impermeabilização do solo, seja transferido para as regiões a jusante (DGAU, 2022).

No que se refere aos impactos não hidrológicos que influenciam significativamente na drenagem urbana, provenientes da urbanização sem planejamento, Porto *et. al.* (2012) destacam os efeitos sobre a ocupação do solo e a gestão político-administrativa. No aspecto da ocupação do solo, observa-se o aumento de loteamentos sem infraestrutura adequada, a ocupação de áreas de risco e o alargamento de favelas e invasões, o que dificulta a implantação de sistemas de canalização e elimina espaços destinados ao armazenamento de águas pluviais. No campo político-administrativo, o crescimento acelerado provoca disputas por recursos financeiros entre setores públicos, resultando em ações corretivas isoladas. Além disso, conflitos de interesses comprometem a implementação de medidas para ordenar o uso do solo, enquanto políticas de médio e longo prazo são negligenciadas.

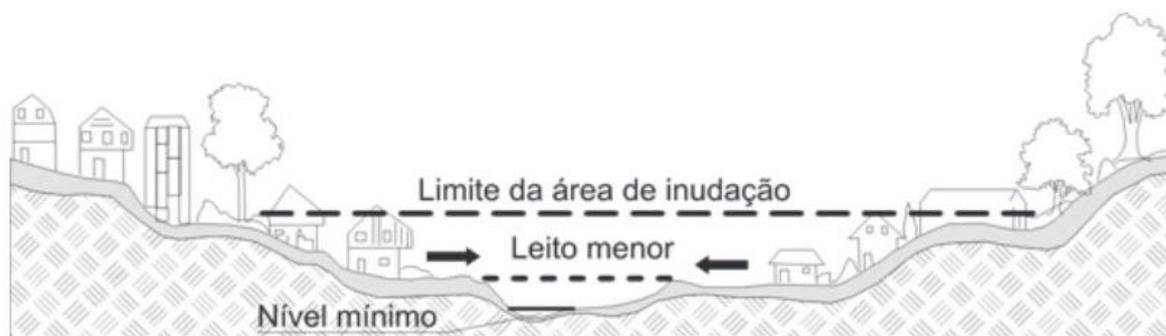
Assim, em um cenário onde estima-se que aproximadamente 68% da população mundial habite em áreas urbanas até 2050 (ONU, 2022), a intensa urbanização, somada aos efeitos adversos das mudanças climáticas, impõe grandes desafios de sustentabilidade aos centros

urbanos, visto que as mudanças do clima são um fenômeno global e presente, capaz de colocar em risco o bem-estar e a sobrevivência da geração atual e futura (Sotto *et. al.*, 2019).

3.2. Planejamento municipal de águas pluviais

A drenagem urbana nos grandes centros urbanos brasileiros não foi tratada com a devida importância, tendo em vista que o aumento das áreas urbanizadas ocorreu primeiramente próximo às várzeas dos rios ou à beira-mar, nas zonas mais baixas, e posteriormente em direção às colinas e morros, onde qualquer variação no nível d'água do corpo hídrico seria capaz de afetar de forma direta as urbanizações existentes (Canholi, 2014). Para Tucci (2005), a inundação do leito maior de um rio caracteriza um processo natural decorrente do ciclo hidrológico das águas, entretanto, quando o leito maior é ocupado, conforme Figura 3.2, os impactos são significativos.

Figura 3.2 – Características dos leitos dos rios



Fonte: Tucci (2005)

A ocupação desordenada do espaço urbano, sem considerar suas limitações naturais, tem impactado diretamente os recursos hídricos no ambiente antrópico. Práticas como o desmatamento, a remoção da vegetação nativa, a implantação de redes de drenagem artificial, a ocupação de áreas sujeitas a inundações, a impermeabilização do solo, a diminuição do tempo de concentração e o aumento do escoamento superficial, quando resultantes de uma abordagem imediatista de ocupação urbana, provocam alterações significativas no ciclo hidrológico. Esses fatores comprometem o funcionamento dos sistemas de drenagem, capazes de gerar consequências negativas para o controle de enchentes e a gestão das águas pluviais (Righetto, 2009).

Segundo Campos e Campos (2015), até a década de 1970, as ações relacionadas a drenagem urbana eram implementadas sem o apoio de uma base sólida do conhecimento

científico, as quais não eram submetidas a avaliações críticas. As propostas de governo, por serem aceitas como dogmas, eram consideradas como as melhores soluções. Nesse contexto, era adotada uma visão higienista para a drenagem urbana, onde o principal objetivo era a retirada rápida das águas pluviais do local onde elas são geradas com o único e exclusivo objetivo de reduzir o impacto das cheias. Também tratada como drenagem urbana convencional, esse método antropocêntrico considera as águas pluviais como indesejadas, inadequadas, prejudiciais e danosas (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019).

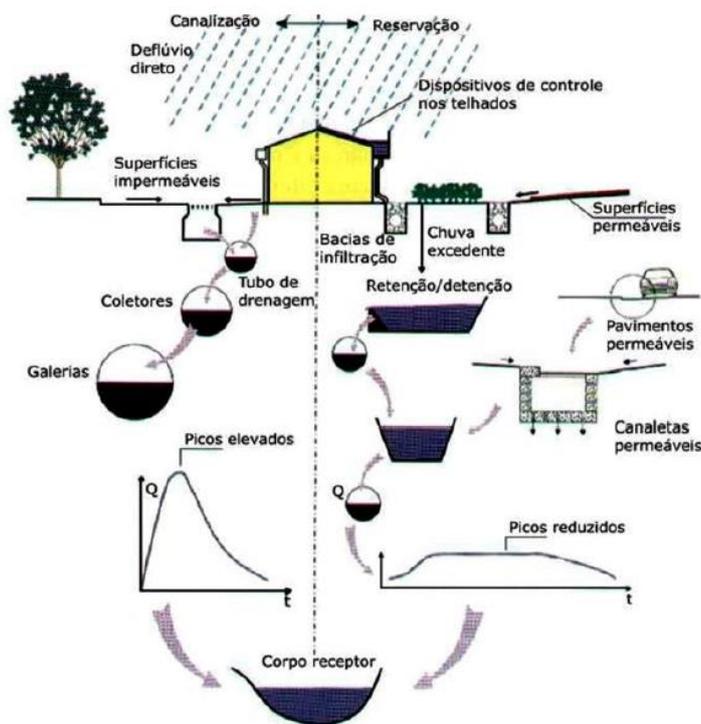
Canholi (2015) define esse conceito de gerenciamento de águas como sanitarista, onde a expulsão das águas residuárias do seu local de produção desconsiderando os seus impactos a jusante, gera a falsa impressão de que o problema está resolvido. Nesse cenário, são utilizadas estruturas clássicas de um sistema de drenagem, como sarjetas, bocas de lobo, canais, tubos e galerias, entretanto, com o processo de impermeabilização do solo, são requeridas estruturas cada vez mais robustas que, apesar de resolver o problema localmente, podem trazer danos para as urbanizações localizadas em cotas de níveis inferiores.

Desse modo, a partir da década de 1970, um novo conceito começa a ganhar destaque em países da América do Norte e Europa. Nesse contexto denominado como ambientalista, os projetos de drenagem priorizavam a conservação dos recursos hídricos naturais, bem como o controle da poluição e a tentativa de minimizar as consequências de um longo período de caráter higienista (Tucci, 2008).

Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019) retratam esse período como o de estímulo ao controle das águas das chuvas na fonte, com o principal objetivo de reduzir os picos de cheia, através da indução à infiltração e a retenção das águas no local de origem. Essa mudança foi fundamentada em uma abordagem desenvolvida e aplicada pela primeira vez ainda nos anos de 1970, em um cenário clássico por meio do uso de reservatório de retenção de águas pluviais, conceito que se expandiu nas décadas seguintes conhecida como LID (*Low Impact Development*).

A Figura 3.3 apresenta um comparativo entre as visões higienista e conservacionista para a drenagem urbana.

Figura 3.3 – Comparativo entre as visões higienista e conservacionista



Fonte: Braga (1994 *apud* Canholi, 2005)

A partir de 1990, os países investiram no desenvolvimento da drenagem sustentável, através de uma política baseada no tratamento das águas pluviais urbanas e rurais, na conservação do escoamento pluvial e no tratamento dos efluentes responsáveis por eutrofizar rios e lagos (Tucci, 2008). De acordo com Souza, Cruz e Tucci (2012) os sistemas de drenagem podem ser considerados sustentáveis caso eles tenham como objetivo a minimização da perturbação aos processos naturais e sociais e do ônus a empreendedores e municipalidades para manutenção e ampliação de sua infraestrutura.

A abordagem sustentável aplicada à drenagem urbana é capaz de redirecionar as ações, através do reconhecimento da complexidade das interações entre os ecossistemas naturais, o ambiente urbano construído e a sociedade (Pompêo, 2000). Sendo assim, essa perspectiva estimula a recontextualização técnica e gerencial das práticas de drenagem e controle de cheias em áreas urbanas. A simples compreensão da interdependência entre o meio ambiente, espaço urbano e comunidade é fundamental para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e urbanização crescente, ao garantir o manejo eficiente das águas pluviais nas cidades (Righetto, 2009).

De acordo com Silva *et. al.* (2024), apesar do fato do uso e ocupação do solo e os recursos hídricos ainda não serem entendidos como elementos do mesmo espaço, as ações

articuladas em um âmbito têm influência direta no outro. Exemplo disso é, ao se ocupar uma área urbana, surgem os impactos internos, os quais ocorrem sobre a própria área urbana e que, posteriormente, são exportados para o sistema de rios da bacia hidrográfica, tornando-os impactos externos. Esses impactos são controlados por padrões a serem atingidos, que podem ser regulamentados por legislações ambiental, de planejamento e de recursos hídricos, em nível federal, estadual e municipal.

Para Righetto (2009), a complexidade do manejo eficiente da bacia urbana e, em particular da drenagem, demanda estudos e avaliações continuados com o claro entendimento de que a dinâmica das cidades envolve múltiplos sistemas e atores, e as questões são sempre atuais, as quais exigem, novos conceitos e tecnologias e ampla discussão nas mais variadas esferas que compõem as forças sociais do município.

Nesse cenário, o Estatuto das Cidades, definido através da promulgação da Lei Federal Nº 10.257/2001, surge como uma ferramenta de ordenamento sustentável do território ao estabelecer normas para o crescimento planejado dos centros urbanos. Frente a isso, surge o Plano Diretor Municipal, instrumento capaz de delimitar a área urbana e orientar o uso e ocupação do solo, de modo a aliar o crescimento populacional com a proteção do meio ambiente e qualidade de vida (Brasil, 2001). As diretrizes gerais da política urbana estabelecidas pela Lei, relaciona as normas urbanísticas vigentes e a proteção do meio ambiente urbano, capaz de atribuir uma função ambiental à propriedade urbana, bem como os instrumentos para sua efetivação (SMDU, 2012).

Para Tucci (2005), essa ferramenta de ordenamento municipal deve desenvolver estratégias em duas principais esferas, sendo: o controle dos impactos existentes através de ações corretivas estruturais responsáveis pela gestão das sub-bacias urbanas e o fomento de medidas não estruturais capazes de levar os tomadores de decisão a utilizar um desenvolvimento mais sustentável. Assim, como ilustrado na Figura 3.4, uma ação integrada dos diversos componentes dos sistemas de águas urbanas, responsável por planejar a cidade com áreas de ocupação e controle da fonte da drenagem, distribuir o espaço de risco e desenvolver os sistemas de abastecimento e esgotamento, atua como fator preventivo de redução no custo das soluções dos problemas relacionados a água.

Figura 3.4 – Visão integrada dos sistemas de águas urbanas



Fonte: Tucci (2003 *apud* Tucci, 2005)

Contrário a isso, uma gestão deficiente dos sistemas de águas urbanas contribui significativamente para a poluição, capaz de agravar os desafios ambientais nos municípios. Assim, é fundamental uma gestão das águas urbanas integrada com ações fundamentais para promover a convivência equilibrada entre a cidade e seus recursos hídricos, essencial para o bem-estar e a qualidade de vida da população (ADASA, 2023).

3.2.1. Medidas de controle de cheias

A partir da necessidade de intervenções na drenagem urbana convencional, o Brasil começou a desenvolver práticas capazes de reverter o cenário das inundações e alagamentos, na tentativa de implantar conceitos ambientais e conservacionistas. Sendo assim, as medidas de controle de inundação passaram a ser tema recorrente, sendo divididas em medidas estruturais e não estruturais (Canholi, 2014).

Tucci (1997) define as medidas estruturais como sendo obras de engenharia capazes de reduzir os riscos de enchentes, classificadas como extensivas, quando agem na própria bacia hidrográfica modificando a relação precipitação e vazão, ou intensivas, quando agem nos rios. A partir desses sistemas, é possível realizar o controle qualiquantitativo da vazão gerada na bacia, através do armazenamento temporário do volume escoado ou pela redução da carga poluidora (Righetto, 2009).

Do ponto de vista da contenção de vazão, os reservatórios ou também bacias de detenção são as medidas mais aplicadas em áreas de ocupação muito densa e que necessitam de espaços

relativamente grandes. No tocante ao aspecto hidráulico dos reservatórios, pelos estudos já desenvolvidos por simulação matemática, pode-se concluir que estes se apresentam como alternativa viável do ponto de vista da redução dos picos dos hidrogramas de cheia (Campana, Bernardes, Silva Jr, 2007).

Por outro lado, a implementação das bacias de retenção tem como impacto negativo a necessidade de serem esvaziadas simultaneamente no mesmo canal de geração de escoamento. Conseqüentemente, apesar de serem eficientes, esses reservatórios quando utilizados em grande quantidade e em múltiplos pontos de uma mesma bacia, acabam perdendo eficiência na redução dos picos de inundação, tornando-se progressivamente mais custosos em comparação com outras soluções disponíveis (Moura; Pellegrino; Martins, 2015).

No Quadro 3.1 são apresentadas as principais categorias de medidas estruturais em função do seu tipo.

Quadro 3.1 – Categorias de medidas estruturais

CATEGORIA	TIPO
Detenção de escoamento	Bacia de retenção ou de atenuação de cheia Bacia de retenção com infiltração
Área inundável	Terreno adaptado a alagamento
Vegetação	-
Dispositivos de infiltração	Vala de infiltração Bacia de infiltração Pavimento poroso
Filtros orgânicos e de areia	Filtro superficial de areia Filtro subterrâneo
Tecnologia alternativas	-

Fonte: Righetto (2015)

Já as medidas não estruturais, de acordo com Canholi (2014), tem como principal objetivo disciplinar a ocupação do território urbano, as atividades econômicas e o comportamento de consumo da população. Assim, as ações não contemplam obras civis, mas envolvem ações de cunho social com a função de modificar padrões por meio de iniciativas legais, sanções econômicas e programas educacionais. As medidas são denominadas sistemas de controle na fonte, pois atuam no local ou próximo das fontes de escoamento (Righetto, 2015).

No Quadro 3.2 são apresentadas as principais categorias de medidas não estruturais em função do seu tipo.

Quadro 3.2 – Categorias de medidas não estruturais

CATEGORIA	TIPO
Educação pública	Educação pública e disseminação do conhecimento
Planejamento e manejo da água	Equipe técnica capacitada Superfícies com vegetação Áreas impermeáveis desconectadas Telhados verdes Urbanização de pequeno impacto
Uso de materiais e produtos químicos	Uso de produtos alternativos não poluentes Práticas de manuseio e de armazenamento adequadas
Manutenção dos dispositivos de infiltração nas vias	Varrição de ruas Coleta de resíduos sólidos Limpeza dos sistemas de filtração Manutenção das vias e dos dispositivos Manutenção dos canais e cursos d'água
Controle de conexão ilegal de esgoto	Medidas de prevenção contra a conexão ilegal Fiscalização: detecção, retirada e multa Controle do sistema de coleta de esgoto e de tanques sépticos
Reuso de água pluvial	Jardinagem e lavagem de veículos Sistema predial Fontes e lagos

Fonte: Righetto (2015)

A fim de se garantir o planejamento consistente de ações de controle e melhorias dos sistemas de drenagem urbana, é fundamental que seja realizada a combinação entre os recursos humanos e materiais, através do balanço harmonioso entre as medidas estruturais e não estruturais (Canholi, 2014).

No que tange o cenário das legislações referentes a coleta e manejo de águas pluviais, como forma de medida de controle de cheias, o assunto ainda é incipiente no país. Tucci (2008) afirma que a regulação da drenagem urbana ocorre em dois níveis distintos, sendo eles a regulação em nível nacional, estadual ou através do Plano de Bacias Hidrográficas ou pela regulação do próprio município, sempre com o objetivo de controlar os impactos internos e evitar a exportação de problemas para a jusante. Para ambos os níveis, existem gestores, instrumentos e metas da gestão, conforme Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Espaço de gestão das águas urbanas

ESPAÇO	DOMÍNIO	GESTORES	INSTRUMENTO	CARACTERÍSTICA
Bacia hidrográfica ⁽¹⁾	Estado ou governo federal	Comitê e agências	Plano de bacia	Gestão da quantidade e qualidade da água nos rios da bacia hidrográfica, sem transferir impactos

ESPAÇO	DOMÍNIO	GESTORES	INSTRUMENTO	CARACTERÍSTICA
Município ⁽²⁾	Município ou Região Metropolitana	Município	Plano Diretor Urbano e Plano Integrado de Esgotamento, Drenagem Urbana e Resíduo Sólido	Minimizar os impactos dentro da cidade, nas pequenas bacias urbanas e não transferir para o sistema de rios

(1) Bacias de grande porte (> 1.000 km²);

(2) Área de abrangência do município e suas pequenas sub-bacias de macrodrenagem (< 50 km²). Os valores de áreas são indicativos e podem se alterar para cidades de grande porte.

Fonte: Tucci (2008)

As regulamentações no nível nacional ou estadual, bem como por meio do Plano de Bacias hidrográficas, podem estabelecer critérios a serem seguidos pelos municípios, baseados na Lei Federal Nº 9.433/1977, a qual institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (Tucci, 2008). A referida política determina a bacia hidrográfica como uma unidade territorial para a gestão de recursos hídricos, capaz de articular-se ao uso e ocupação do solo e integrar-se à gestão ambiental considerando os aspectos qualitativos e quantitativos da água (Brasil, 1977).

Entre seus principais instrumentos, o Plano de Recursos Hídricos apresenta-se como um plano diretor por bacia que tem por objetivo fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento local dos recursos. Durante sua execução, é papel do poder executivo municipal promover a integração com outras políticas locais, assegurando uma gestão integrada e sustentável (Brasil, 1997).

No que se refere às regulamentações municipais, essas são estabelecidas pela própria cidade, que é a responsável pelos serviços de drenagem, conforme previsto na Lei Nº 14.026/2020, o Marco Regulatório do Saneamento (Brasil, 2020). De acordo com Silva *et. al.* (2024), em casos de interesse local, o titular dos serviços de manejo de águas pluviais é o município, e em casos de interesse comum, o Estado pode atuar em conjunto com os municípios. Com relação a prestação dos serviços, podem ocorrer de forma direta, indireta ou por meio de gestão associada, realizados por prestadores públicos, ou por concessionários, regulados por Entidades Reguladoras Infranacionais (municipais, intermunicipais e estaduais).

De acordo com o IBGE (2000), em 99,8% dos municípios, o serviço de drenagem urbana é prestado pelas próprias prefeituras municipais, geralmente responsável pelas secretarias municipais de obras e serviços públicos e em 73,4% dos municípios não há instrumentos reguladores do sistema de drenagem urbana, conforme explicitado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Municípios com drenagem urbana, por existência de instrumentos reguladores, segundo as grandes regiões

MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE DRENAGEM URBANA			
GRANDES REGIÕES	TOTAL	COM INSTRUMENTOS REGULADORES (%)	SEM INSTRUMENTOS REGULADORES (%)
Brasil	4.327	26,3	73,4
Norte	222	20,7	78,8
Nordeste	1.227	13,4	86,5
Sudeste	1.468	26,3	73,2
Sul	1.094	43,2	56,5
Centro-Oeste	316	21,8	77,8

Fonte: IBGE (2000)

Pacheco *et. al.* (2016) afirmam que apesar das legislações brasileiras referentes à coleta de águas pluviais ainda serem ineficientes, o país teve uma forte evolução considerando a pouca discussão acerca do tema. Assim, as legislações são regidas principalmente a nível municipal, com uma incidência menor de regulamentações estaduais e nacionais, a maioria delas em forma de leis e não decretos, onde metade das capitais dos estados brasileiros possuem algum tipo de legislação referente a coleta e manejo de águas pluviais.

O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais (SMDU, 2012) da Prefeitura de São Paulo ilustra um exemplo de regulamentação em nível municipal através da Lei Nº 13.276/2002, conhecida como Lei das Piscininhas. A referida legislação se apresenta como um marco no processo das legislações municipais, ao estabelecer:

Nos lotes edificadas ou não que tenham área impermeabilizada superior a 500m² deverão ser executados reservatórios para acumulação das águas pluviais como condição para obtenção do Certificado de Conclusão ou Auto de Regularização (São Paulo, 2002).

Legislação Semelhante à do Município foi adotada para o Estado de São Paulo, através da Lei Nº 12.526/2007, conhecida por Lei Estadual das Piscininhas (São Paulo, 2007). A Lei Estadual apresenta critérios semelhantes a Lei Municipal, além de destacar no seu artigo 4º que sua implantação se dará no âmbito dos seguintes sistemas de atuação e articulação dos poderes públicos:

I – Política Estadual de Recursos Hídricos e Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SIGRH, instituídos pela Lei Nº 7.663/1991;

II – Política Estadual de Saneamento e Sistema Estadual de Saneamento – SESAN, instituídos pela Lei Nº 7.750/1992;

III – Sistema Estadual de Administração da Qualidade Ambiental, Proteção, Controle e Desenvolvimento do Meio Ambiente e Uso Adequado dos Recursos Naturais – SEAQUA, instituído pela Lei Nº 9.509/1997.

Cenário semelhante acontece para o Rio de Janeiro (RJ), ao promulgar o Decreto Nº 23.940/2004, o qual torna obrigatório nos empreendimentos que tenham área impermeabilizada superior a 500 m², a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento superficial das águas de drenagem para a rede pluvial (Rio de Janeiro, 2004). Em 2020, uma legislação com o mesmo objetivo passou a vigorar no Estado do Rio de Janeiro, através da promulgação da Lei Nº 9.164/2020, a qual preconizava que:

As edificações unifamiliares, a serem projetadas e construídas em perímetro urbano, a partir da publicação desta Lei, que tenham coberturas e telhados, superior a 100 (cem) metros quadrados, deverão ser dotadas de reservatórios de acumulação de águas pluviais para fins não potáveis e de reservatório de retardo, destinado ao acúmulo de águas pluviais, como preservação ambiental da água proveniente das chuvas, e posterior descarga na rede pública de drenagem das mesmas (Rio de Janeiro, 2020).

No município de Porto Alegre (RS), o Decreto Nº 18.611/2014 assume a função de regulamentar o controle da drenagem urbana, ao tornar obrigatório que toda ocupação que resulte em superfície impermeável deve possuir uma vazão máxima específica de saída para a rede pública de águas pluviais igual a 20,8 l/(s.ha) (Porto Alegre, 2014). Além disso, é decretado que toda nova ocupação urbana deverá considerar a aplicação do conceito de desenvolvimento urbano de baixo impacto, por meio da implantação de técnicas que privilegiem a infiltração e a reservação das águas pluviais.

Para o Distrito Federal, a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), através da Resolução Nº 09/2011, estabelece que todo empreendimento que altere as condições naturais de permeabilidade e que realize o lançamento de águas pluviais diretamente em corpos hídricos superficiais, estará sujeito à outorga prévia e à outorga de lançamento de águas pluviais. Assim, a resolução determina os parâmetros de dimensionamento para os reservatórios de qualidade de água, de forma a reduzir a carga poluente a ser lançada no corpo hídrico receptor, e estipula uma vazão máxima de 24,4 l/(s.ha) para lançamento nos cursos naturais (Distrito Federal, 2011).

No município de Jahu (SP), a Lei complementar Nº 559/2020 apresenta a instalação de sistema de reaproveitamento de águas pluviais como um incentivo, ao declarar que a exigência

de recuos laterais nos imóveis destinados a Uso de Serviço de Comércio (USC) fica extinta nos casos de implantação de reservatório de contenção de água de chuva nos empreendimentos (Jahu, 2020).

3.2.2. Planos Diretores de Drenagem Urbana

A crescente valorização do conceito de sustentabilidade ambiental e a necessidade de aumentar a segurança contra eventos hidrológicos extremos no país, principalmente no que se refere ao gerenciamento de inundações em áreas ribeirinhas e os sistemas de drenagem urbana, contribuíram para a elaboração participativa dos Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU) nos municípios brasileiros (Tucci, 2005).

A concepção de planejar uma bacia urbana visando a gestão das inundações deriva do reconhecimento de que há desafios a serem superados e oportunidades a serem aproveitadas. Atualmente, há uma convicção embasada, principalmente, em experiências estrangeiras e algumas nacionais, de que a abordagem mais sensata, econômica e sustentável para resolver essas questões é por meio de uma visão abrangente e integrada, tanto no âmbito temporal quanto espacial (SMDU, 2012)

De acordo com a SMDU (2012), o PDDU tem como principal objetivo orientar as ações e o processo decisório a respeito dos problemas de inundações de uma bacia, com uma visão voltada para o futuro e baseada em informações e tecnologias disponíveis e adequadas do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Righetto (2009) estabelece como principal meta do Plano o planejamento da distribuição dos deflúvios superficiais no espaço urbano em função da ocupação e da evolução da infraestrutura de drenagem, de modo a minimizar e eliminar prejuízos econômicos e sociais.

Canholi (2014) ressalta que a estrutura do PDDU deve ser multidisciplinar e compatibilizada com outros planos e projetos de serviços públicos, como o esgotamento sanitário, abastecimento de água e manejo de resíduos sólidos. O sistema de drenagem urbana, alinhado com a multidisciplinariedade dos serviços públicos, quando bem projetado, proporciona benefícios indiretos como a diminuição do custo com construção e manutenção de vias, melhora do tráfego de automóveis durante as chuvas, redução de custos com implantação de núcleos habitacionais, recuperação de terras sem aproveitamento e saneamento das baixadas (Righetto, 2009).

O referido Plano deve considerar a drenagem como um fenômeno de abordagem regional, ou seja, que pode transcender os limites administrativos dos municípios, sendo a bacia

hidrográfica a unidade delimitadora do estudo (Canholi, 2014). Além disso, para Tucci (2005) é estritamente necessária a coerência e integração entre o Plano citado anteriormente e outros planos municipais, como o Diretor Municipal e de Saneamento Básico. Trata-se de um planejamento multidisciplinar, para que ocorra o devido controle da urbanização de áreas sujeitas a riscos e inundações e a correta orientação quanto ao uso e ocupação do solo do município.

A elaboração um plano eficiente de drenagem e manejo de águas pluviais é um processo complexo que requer a adoção de critérios básicos de planejamento para o sistema de microdrenagem, macrodrenagem e o programa de desenvolvimento de medidas estruturais e não estruturais (SMDU, 2012). É importante salientar que, muitas vezes, surgem interferências com outros planos e restrições orçamentárias, o que pode dificultar a implementação das medidas de controle das inundações. Portanto, é fundamental considerar cuidadosamente esses fatores para garantir o sucesso e a eficiência do plano de drenagem, buscando soluções viáveis e sustentáveis para o gerenciamento adequado das águas pluviais (Tucci, 2005).

Tucci (2002), afirma que o não cumprimento da regulamentação urbana, como os Planos Diretores Urbanos e as normas específicas referentes a loteamentos e parcelamentos de solo urbano, colabora com a expansão irregular da periferia e ocupação irregular pela população de baixa renda. Essa situação torna-se ainda mais preocupante quando ocorre sobre as áreas de mananciais de abastecimento, o que compromete a sustentabilidade hídrica das cidades e dificulta o ordenamento de ações não estruturais do controle ambiental urbano.

3.3. Cenário atual da drenagem urbana

Segundo o Relatório da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2021), no período entre 1970 e 2019, foram contabilizados mais de 11.000 desastres relacionados a Clima, Hidrologia ou Meteorologia nos países membros da Organização das Nações Unidas (ONU). Dos eventos citados, 79% foram relacionados a inundações e tempestades e somaram 85% das perdas financeiras totais contabilizadas no relatório. De acordo com Christofidis, Assumpção e Kligerman (2019), no cenário mundial, 20 milhões de pessoas sofrem anualmente com enchentes, enquanto o Brasil ocupa a 11ª colocação no ranking com 270 mil pessoas atingidas pelas inundações.

Segundo dados do Governo Federal, atualmente, 34,9% dos municípios brasileiros estão suscetíveis a ocorrências de desastres associados a movimentos de massa, alagamentos, enxurradas e inundações (Brasil, 2023). O Quadro 3.4 apresenta os dados relacionados à

ocorrência de enchentes, enxurradas, escorregamentos ou deslizamentos e alagamentos nos municípios brasileiros entre os anos de 2013 e 2016.

Quadro 3.4 – Distribuição dos desastres relacionados a problemas de drenagem no período de 2013 a 2016, por número de municípios atingidos e tipo de área atingida

TIPO DE DESASTRE (2013-2016)	NÚMERO DE MUNICÍPIOS ATINGIDOS	DISTRIBUIÇÃO DOS DESASTRES CONFORME ÁREA ATINGIDA*		
Enchentes	1.515	32,7% em áreas não usualmente inundáveis	32,7% em áreas de ocupação irregular	35,3% em áreas com enchentes
Enxurradas	1.590	35,3% em áreas não usualmente inundáveis	35,1% em áreas de ocupação regular	29,8% em áreas de ocupação irregular
Escorregamento ou deslizamento	833	61,9% em áreas de taludes e encostas sujeitas a deslizamentos	39,5% em áreas com ocupações irregulares	35,5% em áreas sem infraestrutura de drenagem
Alagamentos	1.729	Nada consta		

*A soma de percentuais é superior a 100% (cem por cento) pois algumas ocorrências atingiram mais de um tipo de área.

Fonte: IBGE (2017)

Diante desse contexto, o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, instituído em 2016, se firmou como um instrumento com o objetivo de promover a redução da vulnerabilidade nacional à mudança do clima e realizar uma gestão do risco associada a esse fenômeno. No Plano, foi contemplado entre as medidas de adaptação da Estratégia de Cidades os seguintes itens: o fortalecimento de ações de drenagem urbana sustentável voltadas à redução das enchentes e inundações, adequação de canais para reduzir a velocidade do escoamento, implantação de sistemas de drenagem por infiltração e parques fluviais, recuperação de várzeas e renaturalização de fundos de vale, sempre com a recomendação de que essas ações observem os princípios de Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE) (Brasil, 2016).

Sotto e Philippi Jr. (2022) afirmam que diversas soluções de drenagem mais integradas e focadas na conformação natural das bacias e sub-bacias urbanas têm sido gradualmente introduzidas na cultura do planejamento e gestão urbanos no Brasil. Esse avanço tem possibilitado a implementação de infraestruturas verdes e soluções baseadas na natureza, em alinhamento aos princípios de AbE.

Apesar do desenvolvimento recente de políticas públicas, os desastres causados pelas enchentes no país ainda apresentam periodicidade de ocorrência de eventos ao longo dos anos. Exemplo disso, são as enchentes ocorridas no Estado do Rio Grande do Sul nos anos de 2023 e 2024. Segundo Ruckert *et. al.* (2024), os eventos ocorridos tratam-se de desastres sistêmicos e multidimensionais com inúmeras frentes interconectadas e com efeitos devastadores.

Para o INMET (2024), tais desastres ocorridos na Região Sul do país podem estar associados aos efeitos das mudanças climáticas, ao afirmar:

Uma massa de ar quente sobre a área central do país, que bloqueia a frente fria que está na região Sul e faz com que a instabilidade fique sobre o Estado, causando chuvas intensas e contínuas. Aliado a isso, o período entre o final de abril e o início de maio de 2024 ainda tem influência do fenômeno El Niño, responsável por aquecer as águas do Oceano Pacífico, contribuindo também para que áreas de instabilidade fiquem sobre o Estado. Tudo isso foi potencializado pelo aquecimento global, que torna os eventos climáticos mais frequentes e cada vez mais potentes (INMET, 2024).

De acordo com o Relatório Mundial das Cidades da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), as alterações climáticas são prioridades máximas na agenda de desenvolvimento global. Nesse sentido, foram eleitos pela Agenda 2030 os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), aliados aos diferentes aspectos da sustentabilidade – econômicos, sociais, ambientais, políticos e culturais – os quais buscam a concretização de 169 metas, devidamente monitoradas por indicadores.

De acordo com Sotto *et. al.* (2019), no cenário de mudanças climáticas, o ODS-13 (Ação contra a mudança global do clima) desempenha protagonismo e exerce pressão sobre os Estados para que medidas urgentes sejam tomadas para enfrentar a questão do clima e seus impactos, inclusive em âmbito local. Por sua vez, o ODS-11 veicula, o compromisso de tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Nos eixos de ação previstos, ressalta-se o objetivo de aumentar o número de municípios com políticas e planos integrados para a mitigação e adaptação climáticas e a resiliência a desastres.

3.4. Métodos de quantificação do escoamento

Os modelos computacionais para quantificação de escoamento superficial são úteis para a fase de planejamento e detalhamento de projeto, nos casos de manutenção corretiva e realização de obras complementares, ou nos casos em que se deseja simular cenários sobre o

comportamento de um sistema de drenagem submetido a determinadas condições de precipitação pluviométrica (Righetto, 2009).

Canholi (2014) destaca a relevância do uso de modelos computacionais na simulação hidrológica e hidrodinâmica da drenagem urbana, devido à ampla variedade de ferramentas conceituais disponíveis para representar os diferentes processos envolvidos. Essa diversidade proporciona maior flexibilidade na modelagem e amplia a aplicabilidade dos modelos a distintas condições e demandas de projetos.

Os modelos computacionais podem ser considerados como estocásticos ou determinísticos, a depender do tipo de variável utilizada. Nos casos em que são considerados os conceitos de probabilidade esses são considerados como determinísticos, logo, se uma das variáveis apresentar comportamento aleatório, define-se como estocástico. No que se refere a relação entre as variáveis envolvidas no modelo, essas podem ser classificadas como conceituais ou empíricas. Os modelos conceituais, baseados em processos físicos, simulam os processos que envolvem os fenômenos hidráulico-hidrológicos, e os modelos empíricos fazem uso dos valores observados em suas simulações por meio de relações estimadas (Collodel, 2009).

De acordo com Souza (2017), os métodos utilizados para determinar o escoamento superficial variam conforme a disponibilidade de dados hidrológicos da área de estudo, sendo classificados em métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos baseiam-se exclusivamente em registros fluviométricos para estimar a vazão de projeto, utilizando distribuições estatísticas de probabilidades. Nos casos em que não há evidência de fluviométricos são utilizados os métodos indiretos para a estimativa de vazões, através das técnicas de transformação de chuva em vazão. Os métodos indiretos podem ser divididos em quatro categorias: fórmulas empíricas, método racional, método do hidrograma unitário e simulação hidrológica com modelos conceituais de precipitações máximas, a ser escolhido a depender do objetivo do estudo, da disponibilidade de dados, da importância do projeto e das características da área analisada (Gontijo, 2007).

No Quadro 3.5 são apresentados os modelos hidrológicos mais utilizados na drenagem urbana.

Quadro 3.5 – Modelos Hidrológicos aplicados a drenagem urbana

CÓDIGO	NOME	AGÊNCIA CRIADORA	ANO
MOUSE	<i>Modelling of Urban Sewer</i>	DHI	1985
CHM	<i>Chicago Hydrograph Method</i>	City of Chicago	1959
ILLUDAS	<i>Illinois Urban Drainage Area Simulator</i>	III. Water Survey	1972
STORM	<i>Storage, Treatment, Overflow Runnof Model</i>	Corps of Engineers	1974
TR-55	<i>SCS Technical Release 55</i>	SCS	1975
DR3M	<i>Distributed Routing Rainfall-Runoff Model</i>	USGS	1978
IPH-2	Instituto de Pesquisas Hidráulicas	IPH-UFRS	1981
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>	EPA	1971

Fonte: Viessman e Lewis (2002 *apud* Collodel, 2009)

3.4.1. O modelo SWMM – Storm Water Management Model

O modelo SWMM (*Storm Water Management Model*), é um modelo de gestão de drenagem urbana, desenvolvido pela U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*) em 1971, o qual tem a capacidade de simular a quantidade e a qualidade do escoamento superficial através dos seguintes processos físicos: escoamento superficial, infiltração, águas subterrâneas, degelo de neve, propagação de fluxos, inundações e alagamentos à superfície do terreno, comportamento e evolução da qualidade da água (U.S. EPA, 2012). Por se tratar de um *software* livre e de domínio público, é amplamente utilizado por pesquisadores e tornou-se a principal ferramenta para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais e residuárias (Collodel, 2009).

Desde o seu lançamento no mercado, o modelo passou por atualizações que permitiram o desenvolvimento de um ambiente computacional integrado e com uma versatilidade de funções, desde a entrada dos dados para a área de estudo, a simulação do comportamento hidrológico e hidráulico e a verificação de resultados a partir de gráficos e tabelas de séries temporais, diagramas de perfil e análises de frequência (U.S. EPA, 2012).

As principais aplicabilidades do modelo SWMM são: dimensionamento e concepção de componentes da rede de drenagem para controle de inundações; dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas; delimitação de zonas de inundação em leitos naturais; concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de sistemas unitários e mistos; avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem de águas residuárias; geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes (carga de

contaminantes) e avaliação da eficácia das BMPs (Boas Práticas de Manejo) para reduzir o carreamento de poluentes durante a chuva (U.S. EPA, 2012).

Para Canholi (2014), a possibilidade do SWMM representar uma rede integrada de galerias associada ao escoamento superficial, permite uma simulação eficaz de alagamentos. Esse fenômeno hidráulico comum em bacias urbanas é decorrente da sobrecarga nos sistemas de galerias e bueiros das redes de drenagem urbana, o qual ocasiona o transbordamento das bacias e o aumento do nível d'água nas ruas sem que, necessariamente, ocorra o transbordamento dos córregos e canais principais na região.

O modelo em questão apresenta quatro módulos descritores capazes de representar o comportamento de um sistema de drenagem, os quais são apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Módulos descritores do ambiente para representação

MÓDULO	DESCRIÇÃO
Atmosférico	Representa a precipitação (chuva ou neve) e depósito dos poluentes sobre a superfície do solo, indicados no módulo de superfície do solo
Superfície do solo	Responsável por receber a precipitação do módulo atmosférico através de chuva ou neve e transportar para o módulo de águas subterrâneas por meio da infiltração, ou para o módulo de transporte por meio do escoamento superficial e carreamento de poluentes
Águas subterrâneas	Responsável por receber a infiltração do módulo de superfície do solo e transferir uma parte, como fluxo de entrada, para o módulo de transporte
Transporte	É representado por uma rede de elementos de transporte, sendo eles, os canais, tubulações, bombas e elementos de regulação; e por elementos de unidade de armazenamento e tratamento, responsáveis por conduzir a água para os nós exutórios ou estações de tratamento. No módulo de transporte, os fluxos de entrada podem ser provenientes do escoamento superficial, fluxo subterrâneo, escoamento de águas residuárias ou hidrogramas de entrada

Fonte: U.S. EPA (2012) adaptado pelo autor

A representação do sistema de drenagem no SWMM é realizada pela inserção de objetos no Mapa da Área de Estudo. Os principais objetos componentes do modelo, de acordo com U.S. EPA (2012) são:

- Pluviômetros: Responsáveis por fornecer os dados de entrada das precipitações que ocorrem sobre uma ou mais áreas das sub-bacias definidas na região de estudo;
- Sub-bacias: Unidades hidrológicas com características topográficas e componentes do sistema de drenagem que conduzem o escoamento diretamente

para um único ponto de descarga. Podem ser divididas em áreas permeáveis e impermeáveis;

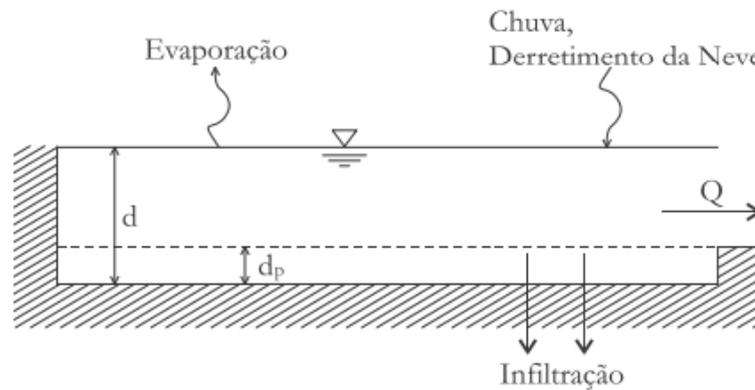
- Nós de conexão: Objetos do sistema de drenagem responsáveis por conectar trechos distintos. Podem ser representados pela confluência de canais superficiais naturais, poços de visita da rede de drenagem ou elementos de conexão de tubulações;
- Nós exutórios: Objeto terminal do sistema de drenagem, o qual define as condições de contorno a jusante do sistema;
- Divisores de fluxo: Objeto do sistema de drenagem responsável por desviar parte do fluxo em um conduto específico de maneira preestabelecida;
- Unidades de armazenamento: Representados por nós do sistema de drenagem capazes de armazenar determinado volume de água, como bacias de contenção e lagos;
- Condutos: Tubulações que conduzem o fluxo de um nó para o outro, representados por diversas geometrias. Para os condutos inseridos no modelo, representados pelos canais ou tubulações que conduzem a água de um nó ao outro, o SWMM utiliza a equação de Manning para relacionar a vazão que escoar pelo conduto, a área transversal, o raio hidráulico e a declividade do trecho, conforme Equação 3.1 (U.S. EPA, 2012).

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{2/3} * \sqrt{S} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde n é o coeficiente de rugosidade de *Manning*, A é a área da seção transversal do conduto (m^2), R_h o raio hidráulico (m) e S a declividade do conduto.

A visão conceitual do comportamento do escoamento superficial pelo modelo pode ser observada na Figura 3.5. Nota-se que, as sub-bacias desempenham a função de um reservatório não linear, o qual recebe as contribuições dos diferentes tipos de precipitação (chuva, neve) e de sub-bacias a montante do sistema. As saídas são provenientes da evaporação, infiltração e escoamento superficial (U.S. EPA, 2012).

Figura 3.5 – Visão conceitual do fenômeno de escoamento do SWMM



Fonte: U.S. EPA (2012)

A capacidade de uma sub-bacia depende do valor máximo de armazenamento em depressões (d_p), referente ao valor máximo armazenável à superfície por alagamento, encharcamento e interceptação. Assim, o escoamento superficial ocorre quando a profundidade de água na sub-bacia excede o valor máximo do armazenamento em depressões. A vazão defluente (Q) da sub-bacia é calculado pela equação de *Manning*, já a lâmina de água no reservatório (d), é recalculada de forma contínua, no tempo mediante a resolução numérica do balanço hídrico na sub-bacia (U.S. EPA, 2012).

Com relação aos modelos de infiltração disponíveis, o SWMM simula o fenômeno pela qual a água da chuva penetra na zona não saturada do solo da área permeável da sub-bacia através dos modelos de infiltração de Horton, *Green-Ampt* ou o baseado no *Curve Number* (CN) do SCS (*Soil Conservation Service*) desenvolvida pelo *National Resources Conservation Service* (NRCS, 2004).

Para o presente trabalho, foi definido o modelo de infiltração baseado no *Curve Number* (CN) do SCS, o qual visa correlacionar a capacidade de armazenamento da sub-bacia a um índice denominado CN, tabelado de acordo com o tipo de cobertura e grupo hidrológico do solo e pela sua condição de umidade antecedente (Canholi, 2015). Essa correlação pode ser observada na Equação 3.2.

$$S_D = \frac{25.400 - 254CN}{CN} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde S_D é o armazenamento máximo (mm) e CN o parâmetro *Curve Number*.

A precipitação efetiva, parcela que contribui efetivamente para a geração do escoamento superficial, é definida a partir da Equação 3.3.

$$P_e = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S_D} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde P_e é a precipitação efetiva acumulada (mm), P a precipitação acumulada (mm), S_D o armazenamento máximo (mm) e Ia a abstração inicial (mm), definida como 20% do armazenamento máximo obtido.

Com relação aos modelos de transporte hidráulico do SWMM, esses utilizam as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento para fluxo gradualmente variado não permanente, através das equações de *Saint Venant* (U.S. EPA, 2012). Para isso, o usuário pode escolher entre três modelos, a depender do nível de sofisticação da modelagem:

- Fluxo em Regime Uniforme;
- Onda Cinemática;
- Onda Dinâmica.

O modelo de Fluxo em Regime Permanente representa a forma mais simples do transporte hidráulico, pelo fato de não haver propagação de vazões e considerar que em cada intervalo de tempo de cálculo o escoamento é uniforme e permanente. Nesse caso, o modelo simplesmente simula a transferência do hidrograma de entrada em um determinado nó de montante de um conduto para um nó de jusante. Assim, não é levado em consideração o armazenamento de água que se produz nos condutos, o ressalto hidráulico, perdas na entrada e na saída, efeitos de remanso e fluxo pressurizado (U.S. EPA, 2012).

O modelo de Onda Cinemática emprega a equação da continuidade juntamente com uma forma simplificada da equação da quantidade de movimento em cada um dos condutos, assim, ele considera que a declividade da superfície livre da água seja igual à declividade do fundo do conduto. Entretanto, esse modelo não é capaz de simular efeitos como o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas, o efeito de remanso ou o fluxo pressurizado (U.S. EPA, 2012).

Por fim, o modelo de transporte da Onda Dinâmica gera resultados mais precisos ao resolver as equações completas unidimensionais de *Saint Venant*, resultante da aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e da equação da continuidade dos volumes nos nós. Além disso, o modelo leva em consideração o armazenamento nos condutos, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas dos condutos, o remanso e o fluxo pressurizado (U.S. EPA, 2012).

Os modelos apresentados utilizam a equação de *Manning* de modo a relacionar a vazão com a profundidade do escoamento, exceto para os casos dos escoamentos pressurizados em condutos circulares, os quais empregam as equações de *Hazen-Williams* ou de *Darcy-Weisbach* (U.S. EPA, 2012).

3.4.2. Aplicações do modelo SWMM

A modelagem hidrológica através do modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), tornou-se uma ferramenta de destaque para prever eventos em bacias urbanizadas, e conseqüentemente, contribuir para a redução de perdas humanas em desastres e evitar gastos ineficazes em obras (Junior *et. al.*, 2023). Nesse sentido, diversos autores utilizam do modelo para representar bacias hidrográficas e tomar decisões com base nos resultados extraídos em modelos computacionais.

Cavalcanti (2020), com o intuito de estudar o comportamento da drenagem urbana frente a eventos de precipitação e retratar o comportamento hidrológico da bacia urbana, aplicou o modelo SWMM na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas/MG. Assim, foi realizada a caracterização da bacia hidrográfica em estudo, o monitoramento fluvio-pluviométrico, a análise de sensibilidade e a calibração manual do modelo de chuva-vazão no modelo de gestão. Os resultados mostraram um desempenho satisfatório do modelo hidrológico SWMM na representação da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.

Collodel (2009) fez uso do modelo para analisar os níveis de detalhamento de uma bacia hidrográfica e verificou a importância de se considerar a microdrenagem na representação dos sistemas, independentemente do nível de detalhamento do trabalho. Foi concluído ainda que, quanto mais detalhada for a representação da bacia, maior será a velocidade do escoamento devido à baixa rugosidade das galerias pluviais, o que resulta em uma vazão de pico mais elevada. No trabalho, foi concluído que as áreas impermeáveis exercem influência significativa nos hidrogramas, o que torna essencial uma análise cuidadosa na definição desse parâmetro.

Babaei, Ghazavi e Erfanian (2018) fizeram uso do modelo para avaliar a precisão do sistema de drenagem da área urbana na cidade de Úrmia, província do Azerbaijão Ocidental, Irã. Para isso, os autores dividiram a área de estudo em 22 sub-bacias e realizaram a calibração do modelo com base no monitoramento de três eventos de chuva e seu escoamento superficial relacionado. Assim, foi concluído que o parâmetro CN foi o mais sensível para a calibração do

modelo hidrológico e o sistema de drenagem da área de estudo não possui capacidade suficiente para conversão do escoamento.

O modelo SWMM também apresenta a possibilidade de representar técnicas de controles por dispositivos de baixo impacto (LID - *Low Impact Development*), projetadas para subtrair parte do escoamento superficial por meio de processos artificiais combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração (U.S. EPA, 2012). Rodrigues e Santini Junior (2021) utilizaram dessa ferramenta para investigar os impactos das técnicas compensatórias na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita, situada no município de Fernandópolis/SP. No estudo foi avaliada a eficácia das técnicas na redução de inundações ao serem implantadas de forma isolada e combinada. As trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, quando aplicados isoladamente, reduziram a vazão de pico em cerca de 30%, enquanto o telhado verde alcançou aproximadamente 12%. No cenário integrado, a redução da vazão de pico chegou a 37% comprovando a eficiência das técnicas compensatórias na mitigação de inundações e a aplicabilidade do modelo.

Silva *et. al.* (2022) também adotaram o SWMM como ferramenta para realizar um estudo de gerenciamento na bacia hidrográfica do Córrego Figueira, localizada no município de Umuarama/PR. Foram aplicados dois dispositivos de baixo impacto, sendo uma bacia de infiltração em 15% da sub-bacia e, em um outro cenário, uma vala de infiltração em 15% da sub-bacia. Nota-se que o modelo apresentou boa performance para simulação e apresentou melhor resultado na redução do escoamento superficial com a implantação da bacia de infiltração.

Junior *et. al.* (2023) desenvolveram um estudo de caso de gestão de águas pluviais para um projeto de loteamento com cerca de 36ha, no bairro de Guaratiba/RJ. Para isso, foi modelado o anteprojeto de uma rede de drenagem para a região, com a simulação de uma chuva intensa com tempo de retorno de 10 anos e duração de 10 minutos. Além disso, foi comparada a implantação de pavimentos permeáveis nos resultados da simulação, os quais mostraram que, para um mesmo tempo de retorno, houve a diminuição das vazões de pico em até 34,53%, além da diminuição dos volumes totais na rede em até 28,73% para tempos de retorno de 10, 20 e 50 anos, demonstrando que a adoção de LIDs em projetos de drenagem em geral permeia estágios de inundações mais suaves.

Barros *et al.* (2016) estudaram a influência da alteração das características físicas e da distribuição do uso e ocupação do solo na geração de escoamento para a bacia urbana do riacho do Sapo, localizada no município de Maceió/AL. Através do modelo SWMM, foi concluído

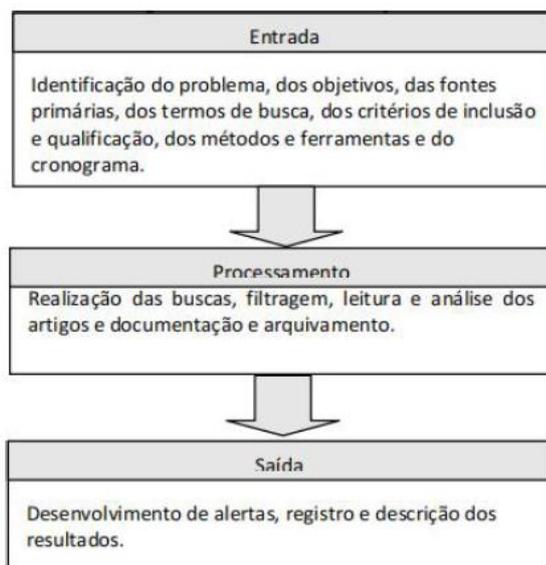
que a discretização do sistema em sub-bacias é fundamental para evidenciar a variabilidade da geração do escoamento e as causas conjuntas. Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade para o aumento das vazões defluentes foram: a ocupação em áreas de maior declividade e em áreas com solos mais permeáveis e a impermeabilização da bacia urbana. Com relação a mudança na vazão de pico, esse fator é influenciado pela parcela impermeável de solo, os parâmetros físicos de largura e a declividade média da sub-bacia, os quais amplificam o efeito de propagação do escoamento superficial da bacia.

3.5. Revisão bibliométrica

A revisão bibliométrica, de acordo com Valença (2023), tem por objetivo analisar e sistematizar o panorama das produções científicas de um determinado tema, por meio de técnicas quantitativas e qualitativas. Dessa forma, é possível identificar as principais tendências sobre o assunto, as lacunas, os autores que mais publicam e as contribuições específicas em um determinado campo do conhecimento.

O desenvolvimento da revisão bibliométrica foi baseada na metodologia de Conforto *et. al* (2011), a qual divide a revisão sistemática em três fases, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 – Metodologia para elaboração da revisão bibliométrica



Fonte: Souza *et. al.* (2019)

A primeira etapa para o desenvolvimento da revisão consistiu-se na definição dos critérios de escolha e na elaboração das *strings* (palavras-chave) para a pesquisa das publicações e autores nos bancos de dados, sendo considerado todos os produtos científicos produzidos até

o mês de janeiro de 2023. Para a definição das *strings*, foram escolhidas palavras relevantes e relacionadas com a drenagem urbana, sendo elas, escoamento superficial, águas pluviais e gestão da água, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – *Strings* inseridas nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*

STRINGS DE BUSCA (PALAVRAS-CHAVE)	Nº DE ARTIGOS	
	SCOPUS	WOS
<i>("urban drainage" or "water management") and "surface runoff"</i>	1.224	501
<i>("urban drainage" or "water management") and "surface runoff" and rainwater</i>	111	45
<i>("urban drainage" or rainwater) and "surface runoff" and "water management"</i>	137	45
<i>"urban drainage" and "water management" and "surface runoff"</i>	45	18

Fonte: Elaboração própria (2023)

Ressalta-se a importância da correta definição e elaboração da primeira fase da pesquisa, tendo em vista que, se realizado um processo de entrada de baixa qualidade, os resultados gerados na fase de Saída serão inválidos, independente da qualidade da etapa de Processamento.

Em seguida, como parte da segunda fase do estudo e com o intuito de verificar a quantidade de artigos nas plataformas de buscas, foram pesquisadas as *strings* definidas, considerando a busca no título, resumo e palavras-chave dos documentos, nas listas de base de dados da *Scopus* e *Web of Science* (WOS), ambas acessadas através da plataforma CAFe disponibilizada pelo Periódicos CAPES.

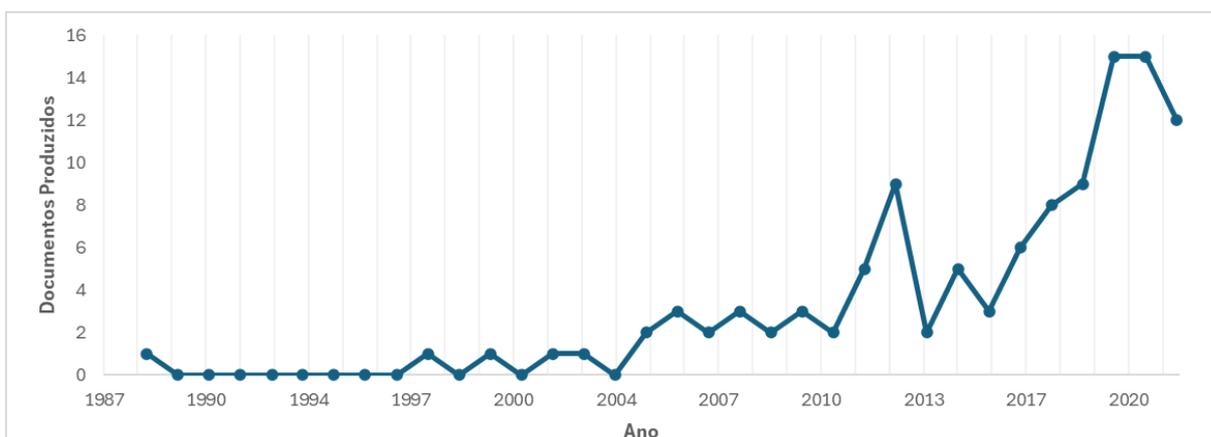
Após a verificação das *strings* elaboradas e a quantidade de trabalhos disponíveis para leitura e análise, optou-se por definir a seguinte equação como objeto de estudo: *("urban drainage" or "water management") and "surface runoff" and rainwater*, devido a quantidade satisfatória de documentos encontrados e consistência das palavras-chave definidas.

Em continuidade da segunda fase da pesquisa, foi escolhida a plataforma *Scopus* para a elaboração da fase de Saída, a qual consiste na produção dos gráficos e descrição dos resultados. Assim, foi extraído do site de buscas o arquivo *BibTex*, contendo informações relevantes sobre os trabalhos científicos encontrados para, posteriormente, serem manipulados. Para a análise dos dados foi utilizado o *software* estatístico *R*, em sua versão 4.3.2, por meio da interface *R Studio*, com a entrada do pacote *Biblioshiny* para o mapeamento de código aberto definido pelo *Bibliometrix*.

Por fim, como resultado da etapa de Saída, foi possível gerar os seguintes gráficos para discussão e posterior comparação com demais autores: um panorama da publicação sobre o tema ao longo do tempo, a produção científica por país, os tipos de documentos mais produzidos e o cenário da colaboração entre os países.

A Figura 3.7 apresenta um panorama das publicações científicas ao longo dos anos.

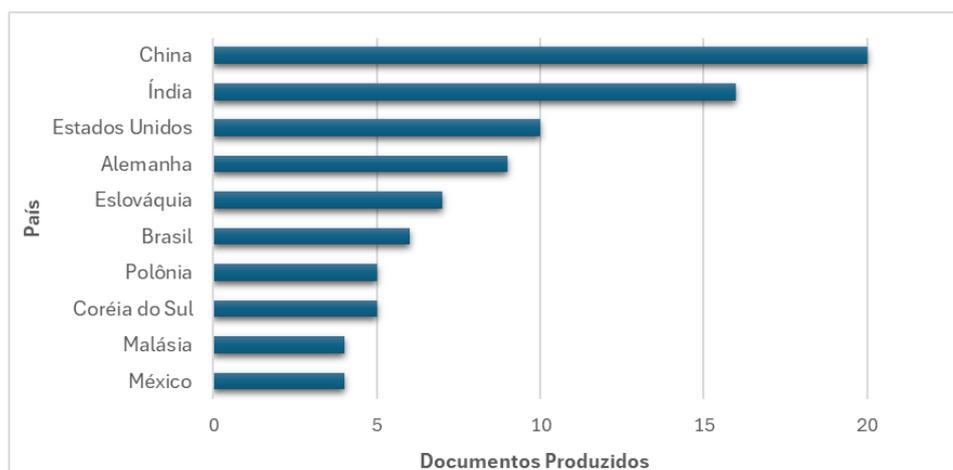
Figura 3.7 – Produção de documentos por ano



Fonte: Elaboração própria (2023)

A Figura 3.8 apresenta a produção de documentos científicos por país, com base nos 10 países que mais publicaram sobre o assunto.

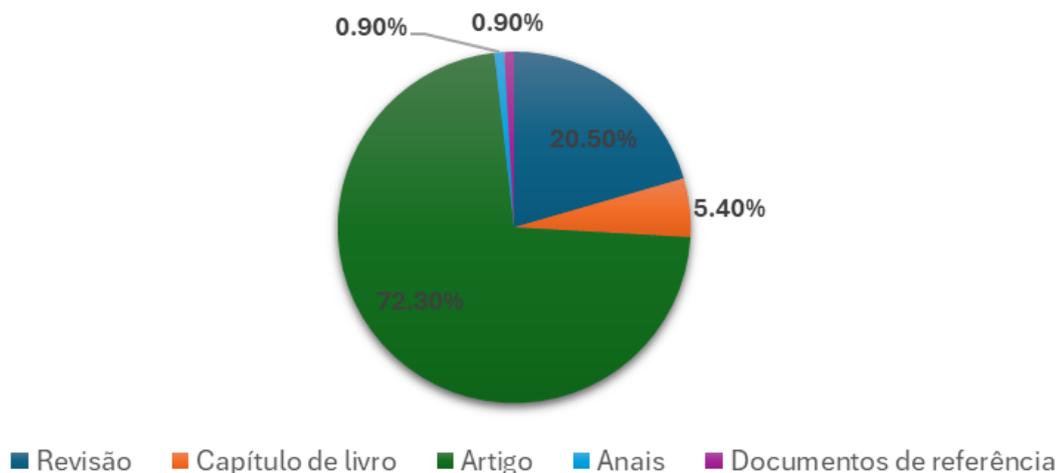
Figura 3.8 – Produção de documentos por país



Fonte: Elaboração própria (2023)

Na Figura 3.9 pode-se observar os tipos de documentos produzidos.

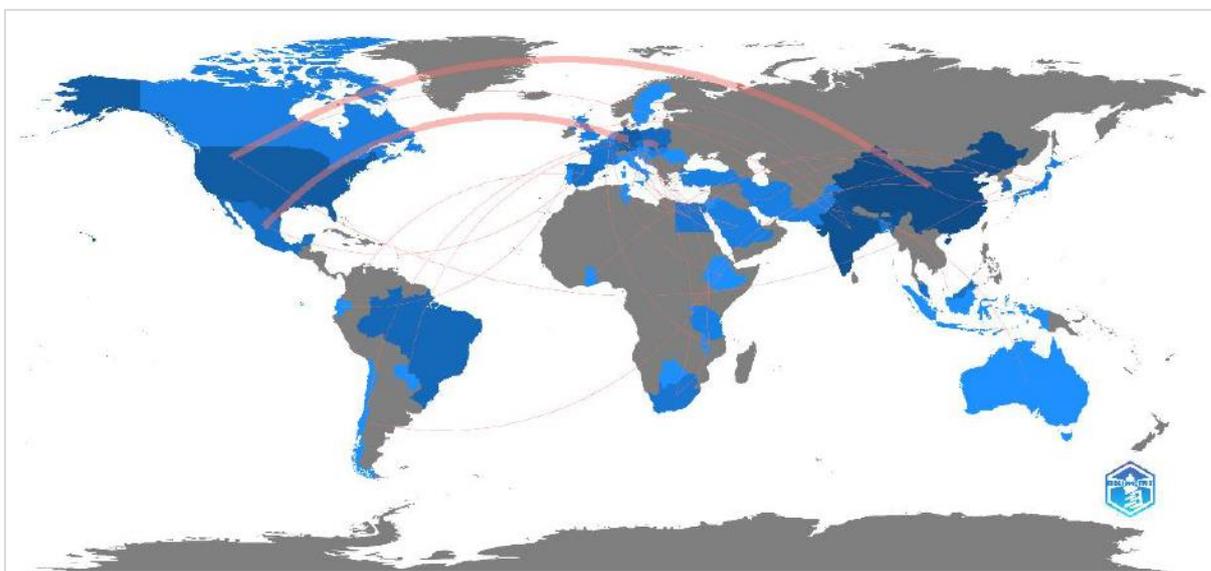
Figura 3.9 – Tipos de documentos produzidos



Fonte: Elaboração própria (2023)

Por fim, na Figura 3.10 é apresentada a colaboração científica entre os países.

Figura 3.10 – Mapa de colaboração entre os países



Fonte: Elaboração própria (2023)

Após a obtenção dos resultados, foi possível analisar os gráficos elaborados e compará-los com demais autores que trataram sobre o assunto. Com relação ao número de publicações no decorrer dos anos, foi possível perceber um crescimento considerável de artigos produzidos entre os anos de 2011 e 2013 e, de maneira geral, um crescimento ao longo dos anos, porém faz-se necessário investigar a possível redução de 9 para 2 artigos produzidos do ano de 2013 para 2014 após 2 anos de crescimento. Entretanto, pode-se notar um aumento significativo no

número de produções a partir do ano de 2016, o que pode ser justificado pela promulgação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável em 2015 pelas Nações Unidas, a qual apresenta a ODS 11 como objetivo para o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, tornando-as ambientes seguros e resilientes.

Souza *et. al.* (2019) em seu trabalho intitulado “Um estudo Bibliométrico e Sistemático sobre o Planejamento de Sistemas de Drenagem Urbana” apresentou resultados que corroboram com os aqui desenvolvidos, ao mencionar a crescente publicação de trabalhos científicos acerca do tema. No que se refere a publicação de artigos nos países, o trabalho citado apresenta a Alemanha como o principal produtor científico e com relação ao Brasil, esse ocupa a 12ª posição no *ranking*, enquanto no presente estudo a China é detentora do maior número de publicações e o Brasil se apresenta na 6ª posição.

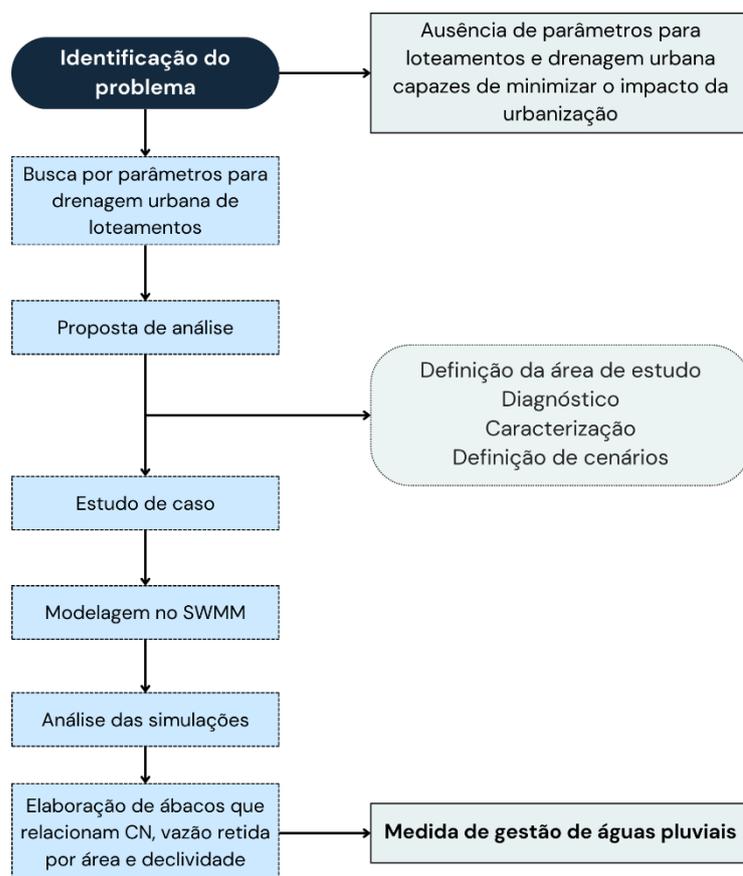
O trabalho de Brito *et. al.* (2022) intitulado “Desenvolvimento de baixo impacto no manejo de águas pluviais urbanas: Uma Revisão Bibliométrica” apresentou queda na quantidade de publicações científicas no ano de 2022, resultado semelhante com o aqui apresentado, além de apresentar os Estados Unidos e a China como os países que mais publicaram sobre o tema. Vale ressaltar que, apesar dos trabalhos comparados apresentarem a mesma metodologia, as palavras-chave pesquisadas foram distintas, o que justifica a diferença nos resultados.

Alves *et. al.* (2023), em seu trabalho o qual discorre sobre as “Abordagens baseada na natureza para gestão sustentável de águas pluviais em ambientes urbanos: Uma Análise Bibliométrica” concluiu que somente na última década revelou-se um crescimento nas publicações referentes as abordagens baseadas na natureza para o gerenciamento de águas pluviais, além de destacar os países da Europa Ocidental como os locais que mais contribuíram com pesquisas relacionadas a gestão das águas no espaço urbano e utilização de sistemas de drenagem sustentável, além da China e Estados Unidos.

4. METODOLOGIA

A fim de se alcançar os objetivos propostos no trabalho, foi seguida a sequência metodológica apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Fluxograma da sequência metodológica adotada no estudo



Fonte: Elaboração própria (2025)

A metodologia detalhada pode ser observada nos itens a seguir.

4.1. Delimitação da área de estudo

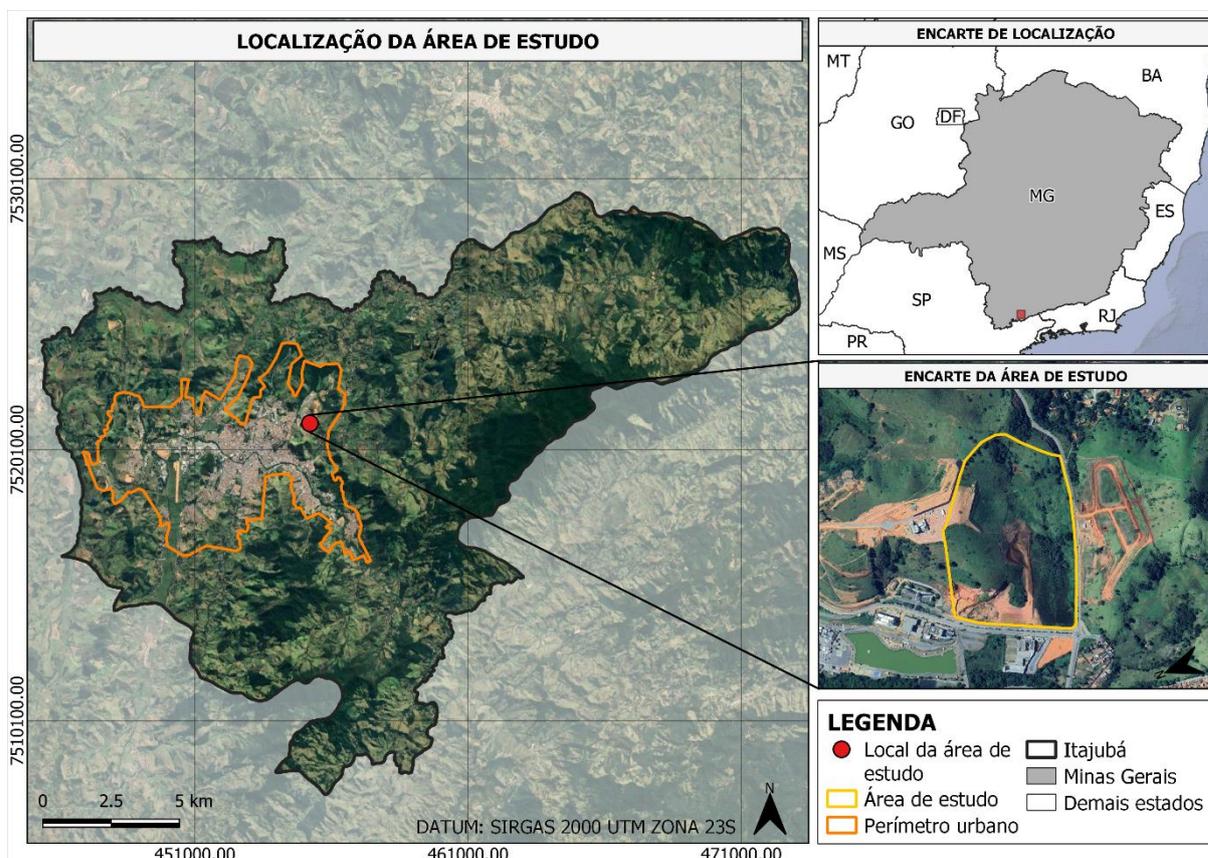
A área adotada para elaboração do estudo de caso corresponde ao Loteamento Cidade Nova localizado no bairro Estiva, no município de Itajubá/MG. O loteamento pertence à área urbana do Município e localiza-se na bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, o qual é um afluente do Rio Sapucaí, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí e inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Grande.

Conforme Lei Municipal N° 3352/2019, a qual aprova o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Itajubá, a área de estudo está localizada em Zona

de Expansão Urbana (ZEU). A ZEU é caracterizada como um conjunto de áreas urbanizadas internas ao Perímetro Urbano e propícias ao parcelamento, ocupação e uso do solo, desde que não estejam situadas em Zona Adensável (ZAD) ou Zona de Adensamento Restrito (ZAR) (Itajubá, 2019). Conforme legislação municipal, ao ser parcelada, a ZEU recebe novo zoneamento, a ser considerada como ZAD ou ZAR.

A localização da área de estudo pode ser observada na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Localização da área de estudo

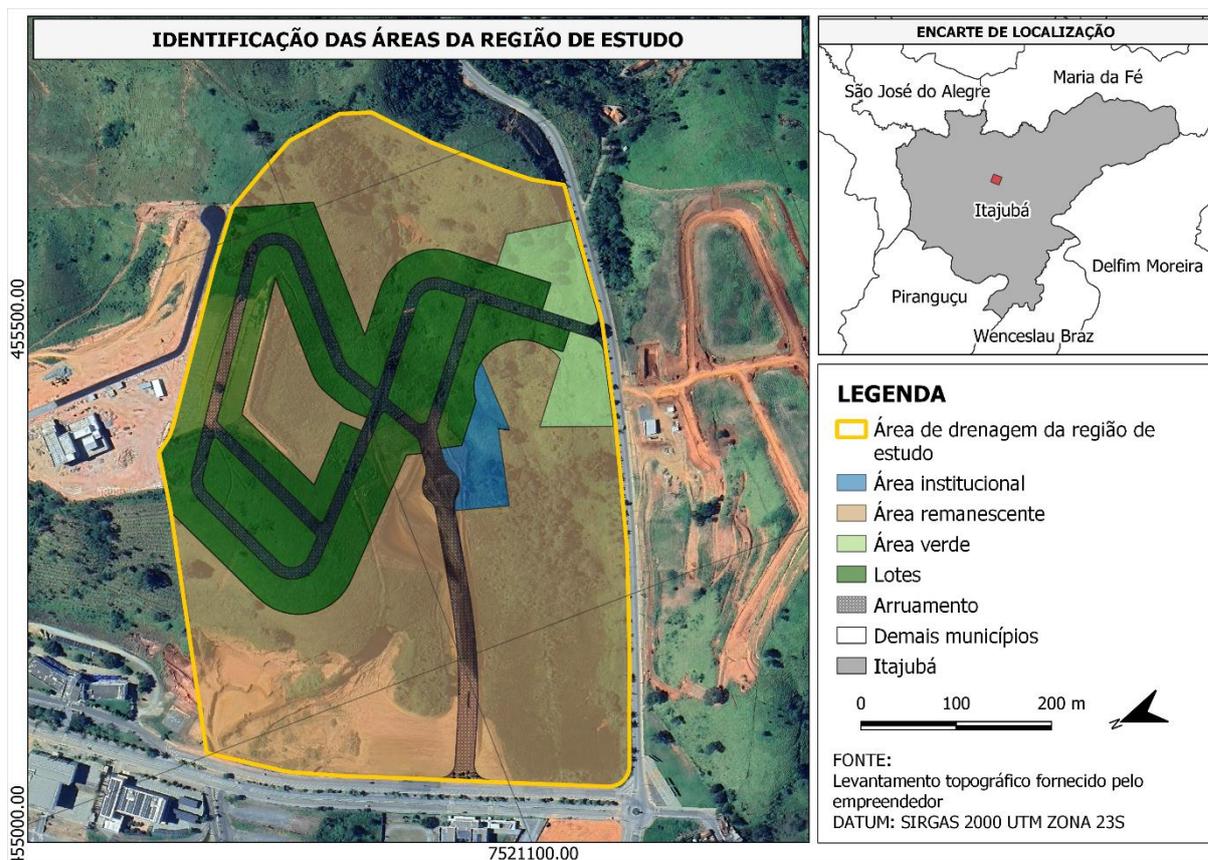


Fonte: Elaboração própria (2025)

O projeto urbanístico do empreendimento conta com áreas destinadas aos lotes e arruamentos, áreas verdes, áreas remanescentes e área institucional. Para a definição das áreas remanescentes, foi considerado a área de contribuição total na qual o loteamento está inserido, logo não foram considerados os limites de propriedade com terceiros, e sim a divisa geográfica das sub-bacias hidrográficas.

A Figura 4.3 ilustra a sub-bacia na qual o loteamento está inserido e as áreas presentes no empreendimento.

Figura 4.3 – Representação das áreas da região de estudo



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Tabela 4.1 apresenta o quadro de áreas da sub-bacia na qual o loteamento está inserido, conforme projeto urbanístico e levantamento topográfico da região.

Tabela 4.1 – Quadro de áreas para a sub-bacia na qual o loteamento está inserido

ITEM	ÁREA (ha)	PORCENTAGEM (%)
Lotes	7,20	24,91
Arruamento	2,69	9,31
Áreas verdes	1,19	4,08
Área institucional	0,59	2,05
Áreas remanescentes	17,23	59,62
Sub-bacia na qual o loteamento está inserido	28,90	100

4.1.1. O projeto de drenagem pluvial do loteamento

O projeto de drenagem pluvial do loteamento objeto de estudo foi elaborado por uma empresa projetista, conforme norma técnica NBR 12.226/2022, e disponibilizado pelo

empreendedor para a realização do presente trabalho. A planta de drenagem pluvial do empreendimento pode ser consultada no Anexo 1.

A rede de drenagem do loteamento foi dimensionada para tubos de concreto convencionais com diâmetro de 400, 600 e 800 mm a depender do trecho da rede coletora e todo sistema será escoado por gravidade até o ponto de lançamento no Ribeirão José Pereira. Com relação aos parâmetros de dimensionamento do projeto, a vazão de projeto foi determinada pelo Método Racional com duração da precipitação de projeto igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica. Os valores dos coeficientes de escoamento superficial (*runoff*) adotados foram de 0,60 para as áreas dos lotes e 0,90 para o arruamento. A equação da chuva intensa para o município foi determinada através do *software* Pluvio 2.1, o qual forneceu os parâmetros da equação de chuva intensa para determinar a intensidade da chuva de projeto.

O Tempo de Retorno adotado para o dimensionamento foi de 10 anos, enquanto o tempo de concentração definido foi de 5 minutos. Como forma de não sobrecarregar a drenagem natural do Ribeirão José Pereira, localizado a jusante do empreendimento, foi dimensionada uma bacia de retenção para deter o volume de água excedente à condição natural da área do empreendimento. A medida de controle na fonte foi dimensionada de forma a receber, armazenar e contribuir para a infiltração do volume armazenado até a liberação gradativa do volume excedente pelo vertedouro interno da estrutura.

O referido projeto de drenagem urbana do loteamento serviu de subsídio para a elaboração das modelagens hidrológicas no *software* SWMM. Entretanto, como o objetivo do trabalho é propor uma medida de gestão de águas pluviais através da vazão a ser retida por área de lote, a bacia de retenção não foi considerada na modelagem do sistema de drenagem da área de estudo no SWMM.

Ressalta-se que o presente trabalho não tem como objetivo avaliar a eficiência do projeto de drenagem pluvial elaborado para o empreendimento, visto que o material sofreu modificações e adequações para ser utilizado como ferramenta para a obtenção das vazões a serem retidas por área de lote como medida de gestão de águas pluviais urbanas.

4.2. Diagnóstico da drenagem urbana no Município

A fim de se obter um panorama atual do município frente a infraestrutura e gestão da drenagem urbana pluvial, foi realizado um diagnóstico do município de Itajubá. Para isso, foi acessado o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), portal administrado pelo Governo Federal e que constitui o maior banco de dados referente aos serviços de água,

esgoto, resíduos sólidos e águas pluviais (SNIS, 2023). As informações disponibilizadas no sistema são fornecidas pelos próprios gestores municipais responsáveis pelo fornecimento do serviço de manejo de águas pluviais urbanas e foram aplicados os seguintes filtros de pesquisa para o ano de 2022.

No que se refere à Infraestrutura:

- Existe Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas no município?
- Existe cadastro técnico de obras lineares no município?
- Qual é o tipo de sistema de Drenagem Urbana?
- Extensão total de vias públicas urbanas do município.
- Extensão total de vias públicas urbanas com pavimento e meio-fio (ou semelhante).
- Quantidade de bocas de lobo existentes no município.
- Quantidade de bocas de leão ou bocas de lobo múltiplas (duas ou mais bocas de lobo conjugadas) existentes no município.
- Quantidade de poços de visita (PV) existentes no município.
- Extensão total de vias públicas urbanas com redes ou canais de águas pluviais subterrâneos.
- Existem vias públicas urbanas com soluções de drenagem natural (faixas ou valas de infiltração)?
- Existe serviço de dragagem ou desassoreamento dos cursos d'água naturais perenes em áreas urbanas?
- Existem parques lineares em áreas urbanas?
- Existe algum tipo de tratamento das águas pluviais?

No que se refere à Gestão de Risco:

- Existem sistemas de alerta de riscos hidrológicos (alagamentos, enxurradas, inundações) no município?
- Existe cadastro ou demarcação de marcas históricas de inundações?
- Existe mapeamento de áreas de risco de inundação dos cursos d'água urbanos?

- Tempo de recorrência (ou período de retorno) adotado para o mapeamento.
- Quantidade de domicílios sujeitos a risco de inundação;
- Quantidade de enxurradas, alagamentos e inundações nos últimos 5 anos;

Além disso, foi consultado o catálogo de Metadados da ANA (2024) para verificar a rede hídrica existente no município, bem como avaliar a influência dos cursos d'água na dinâmica da área de estudo.

4.3. Caracterização da área de contribuição

A área de contribuição na qual o loteamento está inserido foi delimitada através do *software* livre e de código aberto QGis, em sua versão 3.28.13, a partir do levantamento topográfico fornecido pelo empreendedor.

A fim de se obter as principais características acerca do tipo, uso e ocupação do solo da região, inicialmente foi realizada a caracterização pedológica do solo por meio do mapa de solos de Minas Gerais elaborado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (MINAS GERAIS, 2010).

A partir dessa caracterização, foi possível classificar os tipos de solo pertencentes na região através da Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros definida por Sartori (2010). Com isso, foi possível definir o grupo hidrológico do solo da área de estudo, conforme Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Grupo hidrológico dos solos

GRUPO	DESCRIÇÃO
A	Escoamento superficial parcialmente baixo. Solos com uma taxa de infiltração alta, mesmo quando completamente saturados e parcialmente profundos; areia drenada excessivamente ou cascalhos.
B	Solos com uma taxa de infiltração moderada, quando completamente saturado e, principalmente, com profundidade moderada a profundo; solos moderadamente drenados a bem drenados; solos com textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. Por exemplo, solo lemo-arenoso.
C	Solos com taxa de infiltração lenta quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos com uma camada que impede o movimento descendente de água ou solos com uma textura moderadamente fina a textura fina. Por exemplo, solo lemo-argiloso, argilo arenoso com profundidade rasa.
D	Potencial de escoamento superficial alto. Solos com taxa de infiltração muito lenta, quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos argilosos com um alto potencial de expansão; solos com um lençol freático permanente alto; solos com camada de argila na, ou próxima à, superfície, e solos rasos sobre material quase impermeável.

Fonte: U.S. EPA (2012)

Posteriormente, foi definido o valor do parâmetro *Curve Number* (CN) para cada uso do solo através da Tabela 4.2, considerando a condição normal de umidade antecedente (tipo II).

Tabela 4.2 – Valores de CN em função da cobertura do solo e do tipo hidrológico de solo para a condição de umidade II

DESCRIÇÃO DO USO DA TERRA	CLASSES HIDROLÓGICAS DE SOLO			
	A	B	C	D
Terra cultivada				
Sem tratamento para conservação	72	81	88	91
Comm tratamento para conservação	62	71	78	81
Pastagem				
Condição ruim	68	79	86	89
Condição boa	39	61	74	80
Campo				
Condição boa	30	58	71	78
Floresta				
Densidade baixa, coberturas pobres, sem cobertura	45	66	77	83
Boa cobertura	25	55	70	77
Espaços abertos, gramados, parques, campos de golfe, etc.				
Condição boa: cobertura de grama em 75% da área	39	61	74	80
Condição justa: cobertura de grama em 50-75% da área	49	69	79	84
Áreas comerciais e de negócios (85% impermeáveis)				
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93
Residencial				
Tamanho médio do lote (% impermeável)				
0,05 ha ou menos (65)	77	85	90	92
0,10 ha	61	75	83	87
0,13 ha	57	72	81	86
0,20 ha	54	70	80	85
0,40 ha	51	68	79	84
Estacionamento pavimentado, telhados, calçadas				
Ruas e estradas	98	98	98	98
Pavimentada com meio fio e drenagem	98	98	98	98
Em cascalho	76	85	89	91
Sujas	72	82	87	89

Fonte: U.S. EPA (2012)

Definidos os parâmetros anteriores, foi necessário determinar o tempo de concentração (tc) da área de contribuição, o qual corresponde ao tempo necessário para que o exutório receba o escoamento da bacia hidrográfica (Silveira, 2005). Desse modo, foi considerada o estudo proposto por Silveira (2005), o qual elencou as melhores fórmulas para determinação do tc com base no tamanho da área de contribuição, conforme explicitado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fórmulas de TC recomendadas para bacias hidrográficas urbanas

METODOLOGIA	ÁREA (Km ²)	EM* (%)	EP** (%)
Kirpich	< 2.700	1	39
Carter	< 1.100	1	40
Schaake	< 62	-9	30

*Erro Médio Percentual

**Erro Médio Padrão

Fonte: Silveira (2005) adaptada pelo autor

Dessa forma, foram comparados os valores do tc para bacias urbanas através das metodologias de Carter, Schaake e Kirpich, conforme as Equações 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$TC = 0,0977 * L^{0,6} * S^{-0,3} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$TC = 0,0828 * L^{0,24} * S^{-0,16} * A_{\text{imp}}^{-0,26} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$TC = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Sendo, TC o tempo de concentração (horas), L o comprimento do curso d'água principal (km), S a declividade média equivalente (m/m) e A_{imp} a fração de área impermeável da bacia hidrográfica.

O cálculo da declividade equivalente (S) foi realizado através da Equação 4.4.

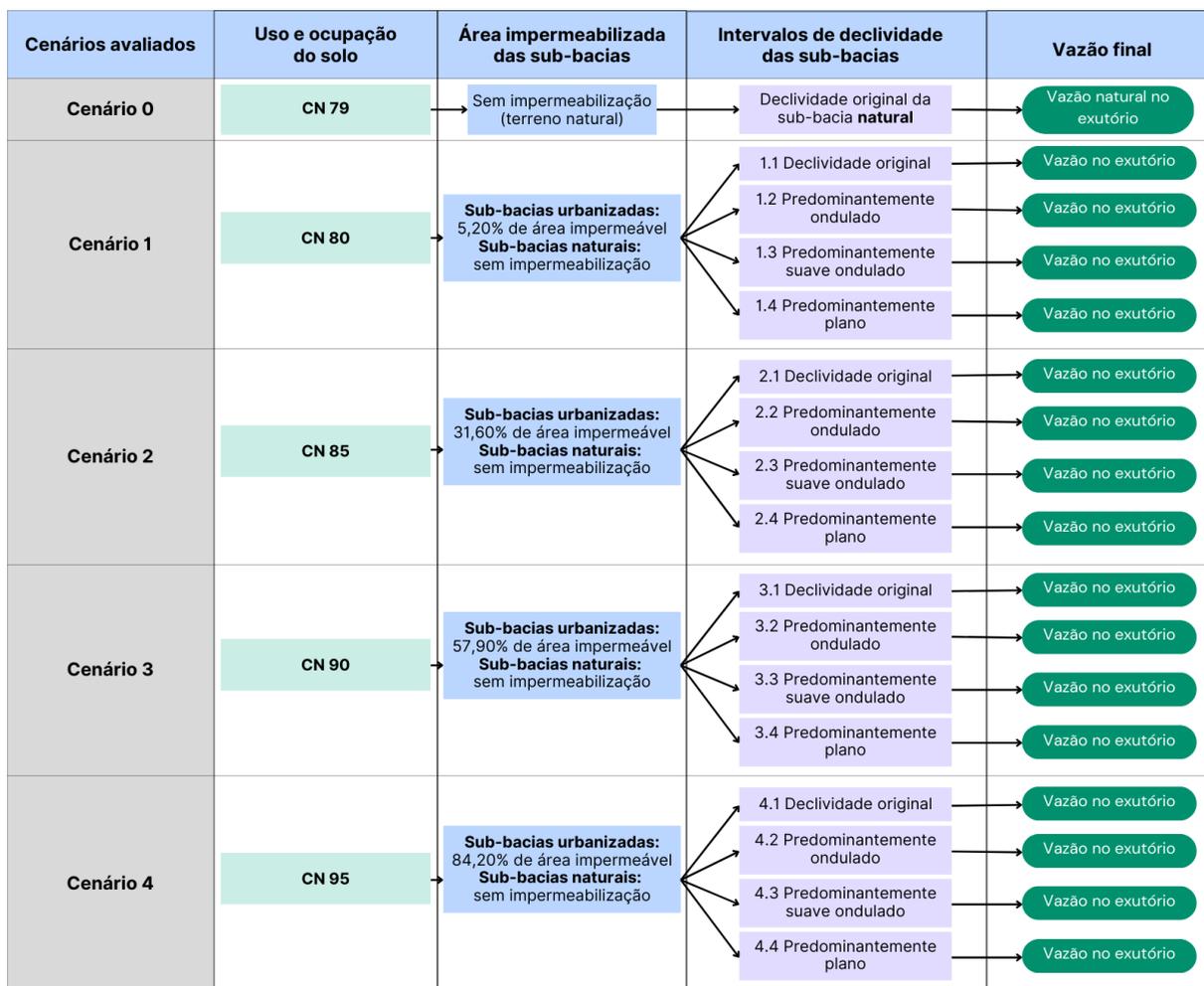
$$S = \left(\frac{\sum_i L_i}{\sum_i \sqrt{S_i}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Sendo, S a declividade média equivalente (m/m), L_i os comprimentos elementares (m) entre curvas de níveis consecutivas medidos ao longo do talvegue principal e S_i as declividades de cada comprimento elementar L_i (m/m).

4.4. Definição dos cenários avaliados

Após a caracterização da área de drenagem do empreendimento por meio da definição dos parâmetros físicos e hidrológicos, foi possível elaborar os cenários a serem realizadas as simulações hidrológicas. Dessa forma, foram definidos cinco cenários esquematizados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Cenários avaliados



Fonte: Elaboração própria (2025)

Como observado, os cenários foram definidos a partir da mudança do uso e ocupação do solo, representada pela variação do parâmetro CN, e pela alteração da declividade. A variação do parâmetro CN foi definida a partir do uso e ocupação do solo da área natural, sem nenhum processo antrópico e, a partir disso, optou por variar o parâmetro em intervalos de 5 unidades até o valor máximo de 95.

Para cada cenário, as declividades foram variadas de modo que a maioria das sub-bacias urbanizadas apresentassem a mesma classe de declividade, conforme definição da Embrapa (1979) apresentada no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Distribuição das classes de declividade

RELEVO	CLASSE DE DECLIVIDADE (%)
Plano	0-3
Suave ondulado	3-8

RELEVO	CLASSE DE DECLIVIDADE (%)
Ondulado	8-20
Forte Ondulado	20-45
Montanhoso	45-75
Forte Montanhoso	> 75

Fonte: Embrapa (1979)

Ressalta-se que os parâmetros das sub-bacias naturais do empreendimento, ou seja, aquelas que não serão parceladas em lotes, foram mantidos com as características físicas originais. Cada cenário foi avaliado para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos.

O detalhamento de cada cenário pode ser observado nos itens a seguir.

4.4.1. Cenário 0

O cenário 0 foi definido como o cenário de pré-urbanização, sendo feita a simulação hidrológica para as características da sub-bacia antes da implantação do empreendimento. Esse cenário tem por objetivo quantificar a vazão natural do sistema e, assim, servir como referência para o cálculo da vazão a ser retida por área de lote para que o volume de escoamento dos cenários não exceda a condição natural. Pela Tabela 4.2, foi considerado o valor do parâmetro CN de 79 para toda a área de drenagem, tendo em vista que o uso e ocupação original da região do empreendimento foi definido como pastagem em condições ruins.

Com relação a simulação hidrológica, para esse cenário não foram consideradas áreas impermeáveis e todo escoamento superficial foi conduzido para um único ponto referente ao exutório da sub-bacia.

4.4.2. Cenário 1

Para o cenário 1 foi definido o valor do parâmetro CN de 80, o qual corresponde a aproximadamente 5,20% da área das sub-bacias urbanizadas como impermeável. Para as sub-bacias naturais, foi definido a condição natural de uso e ocupação do solo, caracterizado por pastagem em condições ruins e parâmetro CN 79.

Com relação às declividades médias das sub-bacias urbanizadas, cada cenário foi subdividido e simulado para quatro intervalos de declividade estipulados. Para cada intervalo, a referência foi a declividade original das sub-bacias, a qual corresponde ao relevo como predominantemente forte ondulado, conforme Embrapa (1979). A partir disso, as declividades foram diminuídas em 5% à característica anterior definida e caracterizados como predominantemente ondulado, suave ondulado e plano.

4.4.3. Cenário 2

Definido o valor do parâmetro CN para o cenário 1, os demais cenários tiveram o valor do parâmetro reduzido em 5 unidades. Assim, para o cenário 2 foi definido o CN de 85, o qual corresponde a aproximadamente 31,60% da área das sub-bacias urbanizadas como impermeável. Para as sub-bacias naturais, foi definido a condição natural de uso e ocupação do solo, caracterizado por pastagem em condições ruins e parâmetro CN 79.

Para as declividades médias, foi considerada a mesma premissa definida para o cenário anterior.

4.4.4. Cenário 3

Para o cenário 3 foi considerado o valor do parâmetro CN de 90, o qual corresponde a aproximadamente 57,90% da área das sub-bacias urbanizadas como impermeável. Para as sub-bacias naturais, foi definido a condição natural de uso e ocupação do solo, caracterizado por pastagem em condições ruins e parâmetro CN 79.

Para as declividades médias, foi considerada a mesma premissa definida para o cenário anterior.

4.4.5. Cenário 4

Para o cenário 4 foi considerado o valor do parâmetro CN de 95, o qual corresponde a aproximadamente 84,20% da área das sub-bacias urbanizadas como impermeável. Para as sub-bacias naturais, foi definido a condição natural de uso e ocupação do solo, caracterizado por pastagem em condições ruins e parâmetro CN 79.

Para as declividades médias, foi considerada a mesma premissa definida para o cenário anterior.

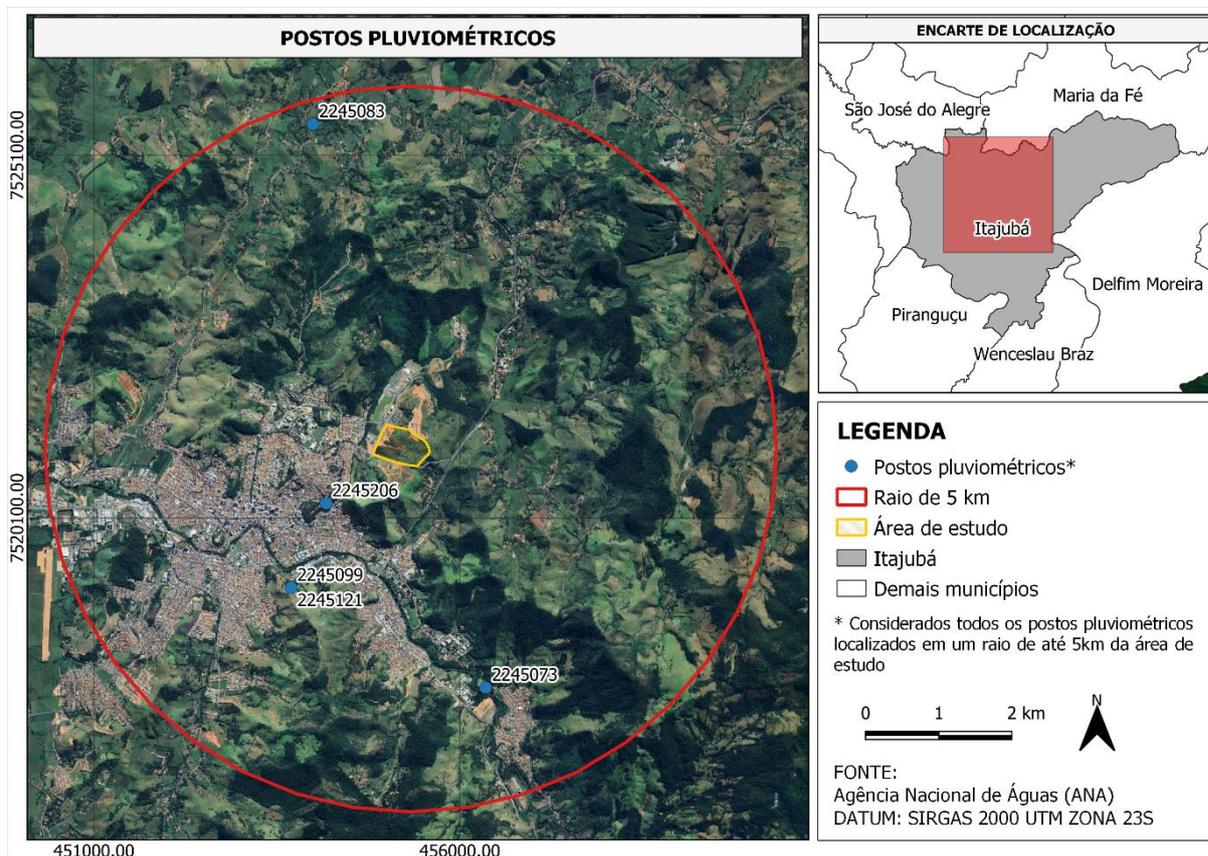
4.5. Estudo de chuvas intensas

O estudo de chuvas intensas para subsidiar a simulação hidrológica no SWMM teve início com a definição da série histórica de dados pluviométricos para a obtenção da chuva de projeto. As chuvas intensas são geralmente determinadas como aquelas que, em um curto espaço de tempo, registram um grande volume de água precipitado.

A fim de se obter dados históricos de chuva, foram pesquisadas as estações pluviométricas cadastradas no Portal HydroWeb ANA inseridas em um raio de 5 km da

localização do empreendimento. As estações localizadas podem ser observadas na Figura 4.5 e suas principais informações foram registradas na Tabela 4.4.

Figura 4.5 - Localização dos postos pluviométricos



Fonte: Elaboração própria (2024)

Tabela 4.4 – Postos pluviométricos identificados

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	DISTÂNCIA (km)	PERÍODO DE DADOS
2245206	Itajubá	-22°25'22.08"	-45°26'43.08"	1,47	Estação sem dados
2245099	Itajubá	-22°25'59.88"	-45°27'00.00"	2,61	Estação sem dados
2245073	Itajubá (Inmet)	-22°25'59.88"	-45°27'00.00"	2,61	Janeiro/1941 - Outubro/1969
2245121	Itajubá	-22°25'59.88"	-45°27'00.00"	2,61	Janeiro/1961 - Julho/1968
2245083	São João de Itajubá	-22°22'32.16"	-45°26'48.84"	4,75	Janeiro/1966 - Maio/2023
2245206	Itajubá	-22°25'22.08"	-45°26'43.08"	1,47	Estação sem dados

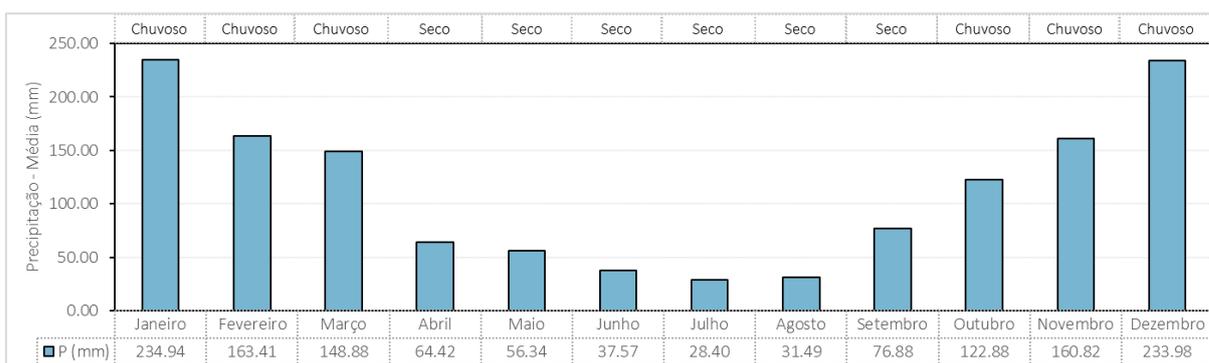
Fonte: Elaboração própria (2024)

Desse modo, foi definida a estação pluviométrica São João de Itajubá, código 2245083, para o fornecimento dos dados históricos de pluviometria e a obtenção da chuva de projeto. Apesar de ser a estação mais distante da área de estudo, foi a única que apresentou série história de dados superior a 30 anos, conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

A estação apresenta dados registrados a partir de janeiro de 1966 até maio de 2023 com falhas nos dados em determinados anos. A quantidade de dados faltantes por mês, bem como a chuva máxima do ano hidrológico para todo o período de dados da estação pluviométrica, pode ser observada no Apêndice A.

O regime pluviométrico da estação, representado pelas chuvas médias mensais, pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Chuvas médias mensais em Itajubá - Estação Pluviométrica São João de Itajubá (2245083)



Fonte: ANA (2024) adaptado pelo autor

Nota-se que a região apresenta um período chuvoso bem definido entre os meses de outubro e março, com chuva média mensal máxima de 234,94 mm para o mês de janeiro, e período seco entre abril e setembro, sendo julho o mês com a menor volume de precipitação média mensal registrado.

4.5.1. Análise de frequência de chuva

A partir da definição da estação pluviométrica utilizada no estudo, foi possível realizar a análise de frequência de chuva. Essa etapa do estudo de chuvas intensas tem por objetivo verificar o comportamento da precipitação e em qual intervalo de tempo ela pode ocorrer novamente, através da probabilidade de ocorrência de valores abaixo ou acima de uma determinada chuva de referência. O inverso dessa probabilidade pode ser determinado como o

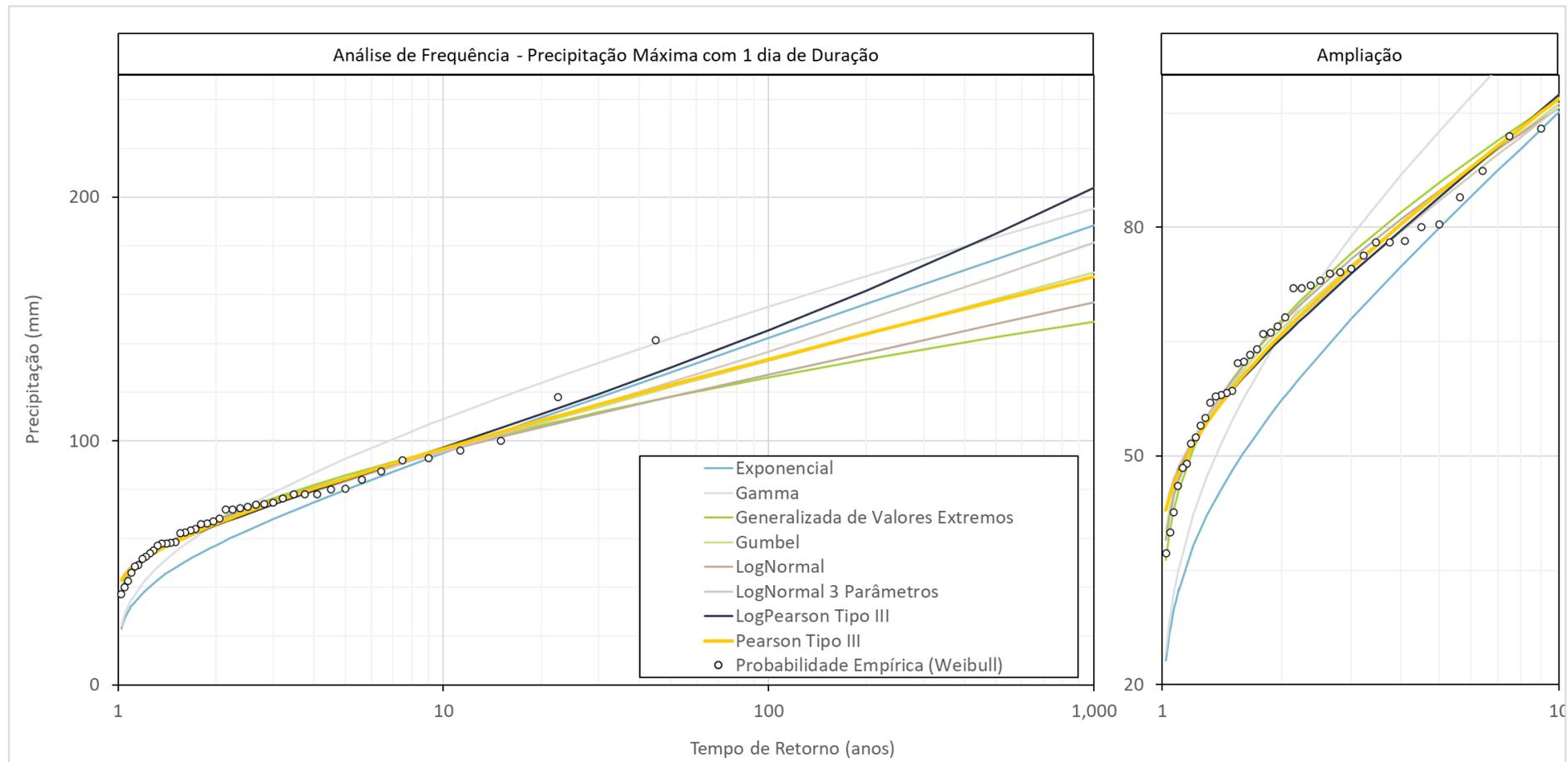
Tempo de Retorno (TR), definido como o intervalo decorrente entre duas ocorrências subsequentes de uma chuva.

A partir dos valores de chuva média observados para o período analisado, foi possível aplicar a análise do ajuste de frequências de cheias para as seguintes distribuições estatísticas: Exponencial, Gama, Generalizada de Valores Extremos, Gumbel, Log-Normal, Log-Normal III, Log-Pearson III, Pearson III. Além disso, foi analisada também a probabilidade empírica através da posição de plotagem de Weibull. Os pontos amostrais ajustados para cada distribuição estatística podem ser observados na Figura 4.7.

A partir das curvas geradas, foi possível verificar a aderência a partir da análise visual e por meio de testes estatísticos convencionais como Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov através do software Análise de Frequência Local de Eventos Anuais (ALEA), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG, 2012).

A partir disso, a distribuição teórica de probabilidades de Gumbel foi escolhida como a mais representativa da amostra, pois apresentou o melhor ajuste aos dados empíricos e os maiores níveis de significância nos testes de aderência realizados.

Figura 4.7 – Distribuição de frequências para precipitação máxima



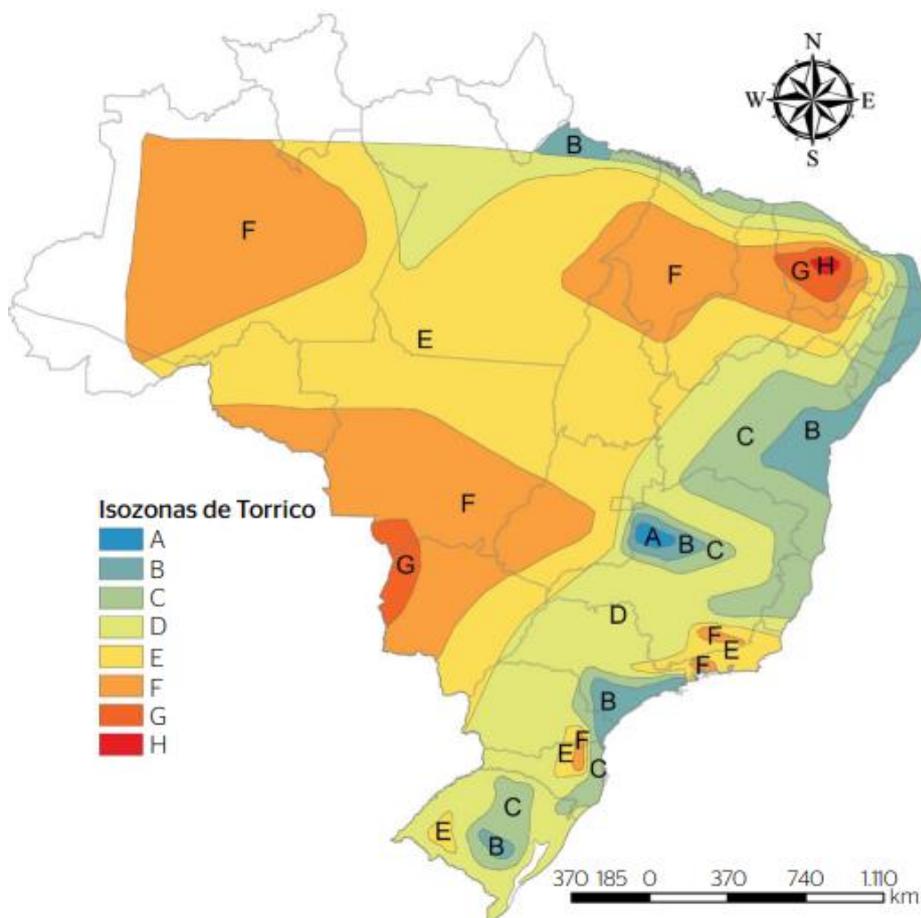
Fonte: Elaboração própria (2024)

4.5.2. Desagregação da precipitação diária

Posteriormente, com o intuito de obter a chuva de 24 horas, foi realizada a desagregação da precipitação diária através da metodologia das isozonas proposta por Torrico (1974). A metodologia propõe que para determinadas regiões do Brasil, ao se prolongar as semirretas de um gráfico para as alturas de chuva x duração, elas tendem a interceptar o eixo das ordenadas em um ponto em comum. Dessa forma, nas regiões em que isso acontecia, a relação entre as precipitações de 1 hora e de 24 horas (a fração da chuva total de 24 horas que cai em uma única hora), assim como a relação entre a precipitação de 6 minutos e 24 horas, é homogênea e constante, independentemente da altura da precipitação.

O mapa com a localização das isozonas pode ser observado na Figura 4.8 e os coeficientes de desagregação de chuva diária são apresentados na Tabela 4.5.

Figura 4.8 – Mapa de isozonas



Fonte: Torrico (1974 apud Basso *et. al*, 2016)

Tabela 4.5 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas

ISOZONA	1h/24h										6 min/24 h	
	TR (ANOS)										TR (ANOS)	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1.000	10.000	5-50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,4	37,2	36,0	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Torrico (1974 *apud* Basso *et. al*, 2016)

Em posse da precipitação diária obtida pela distribuição teórica de Gumbel, foi possível obter as alturas de chuva de 24 horas de duração através da Equação 4.5.

$$P_{24} = 1,10 * P_{1dia} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

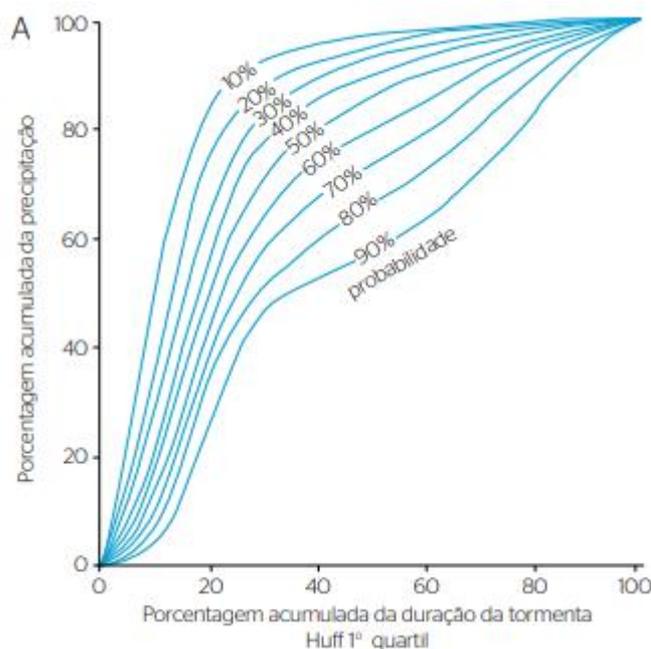
Como a área de estudo pertence a isozona D, foi possível extrair os valores das relações entre a chuva de 24 horas e as alturas de chuva de 1 hora e 6 minutos para cada tempo de retorno desejado.

4.5.3. Discretização temporal da chuva

Por fim, a discretização temporal da chuva foi realizada com base no Método de Huff, o qual desenvolveu padrões médios de distribuição temporal de chuva baseado em quatro quartis (Huff, 1967 *apud* Canholi, 2014). As precipitações intensas de curta duração são classificadas no 1º quartil, as quais são de maior interesse para os projetos de drenagem urbana.

Dessa forma, foi adotado o respectivo quartil, ilustrado na Figura 4.9, para a discretização das chuvas em intervalo de 1 minuto.

Figura 4.9 – Gráfico referente ao 1º quartil de Huff



Fonte: Torrico (1974 apud Basso *et. al.*, 2016)

4.6. Simulação hidrológica

A simulação hidrológica foi realizada por meio do *software* SWMM (*Storm Water Management Model*), em sua versão 5.00.22, disponibilizada pela *Environmental Protection Agency* (EPA), com o objetivo de simular a quantidade de escoamento superficial por meio de um único evento chuvoso.

O modelo hidrológico foi desenvolvido com base em critérios técnicos explicitados em bibliografia, além dos dados fornecidos pelo projeto de drenagem urbana do empreendimento e de informações obtidas na fase de coleta de dados. Assim, ressalta-se que o modelo não foi calibrado devido a insuficiência de dados de precipitação e vazão para esse procedimento.

Para o modelo de transformação chuva-vazão, foi adotado o método CN-SCS, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS) que leva em consideração os parâmetros de classificação hidrológica e de cobertura de solo, através do parâmetro *Curve Number* (CN). Para a propagação de fluxo, foi definido o Modelo de Onda Cinemática (U.S. EPA, 2012) e considerado o passo de tempo de 1 segundo para a simulação hidrológica, sendo possível o alagamento em cima dos nós.

Os demais dados de entrada necessários para inserção no *software* podem ser observados nos itens a seguir.

4.6.1. Pluviômetros

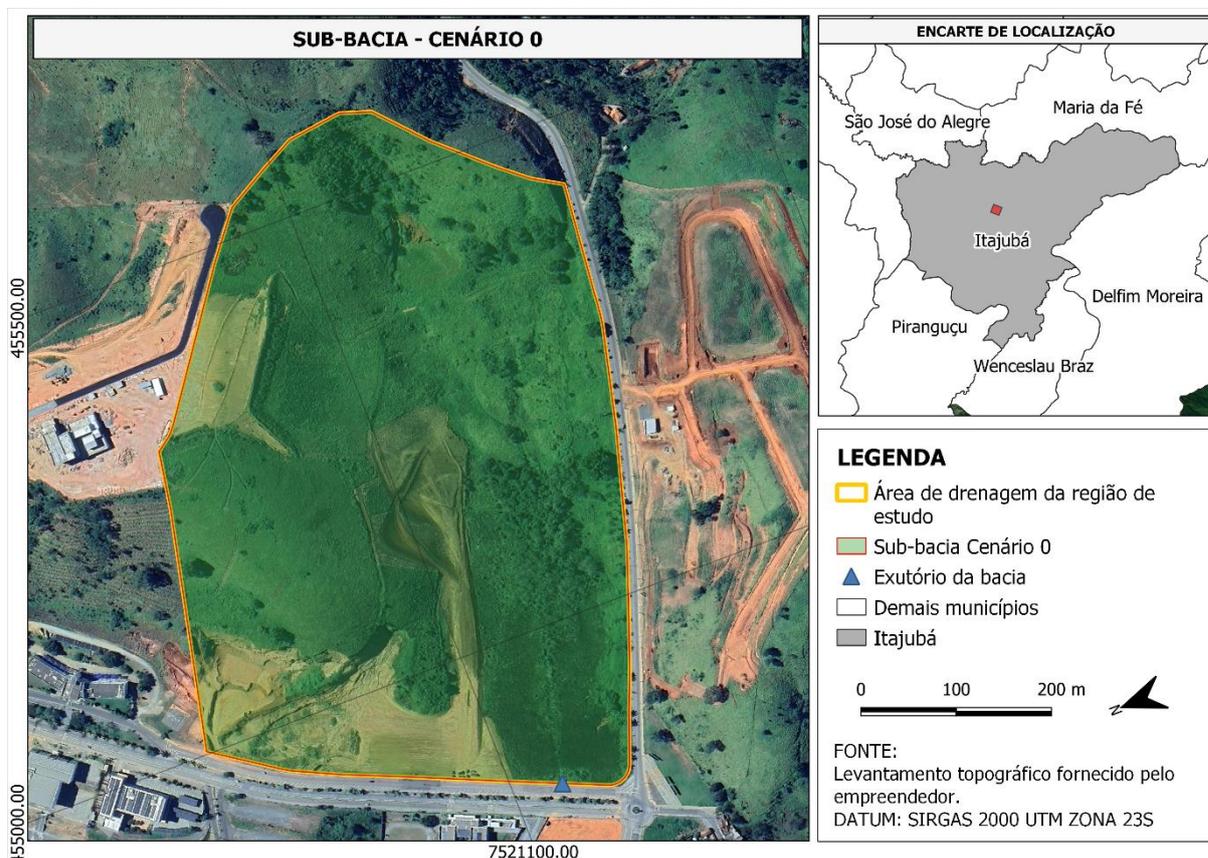
O pluviômetro tem por objetivo fornecer ao modelo os dados de entrada das precipitações que ocorrem sobre as sub-bacias delimitadas na área de estudo. Para o modelo, foram inseridas as alturas de chuva incremental referentes a duração de 10 minutos, associadas aos Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, e discretizadas em intervalos de 1 minuto pelo método de Huff (1990), conforme mencionado no item 4.5.3.

4.6.2. Sub-bacias

As sub-bacias são objetos da simulação que conduzem o escoamento superficial para um determinado nó ou outra sub-bacia. Para a simulação do cenário 0, referente a pré-urbanização, foi considerada uma única sub-bacia para toda a área de drenagem da região de estudo. Para os demais cenários, a fim de avaliar a influência da urbanização por meio do parâmetro CN, foi considerada a distinção entre sub-bacias naturais e urbanizadas, definidas com base no projeto de drenagem pluvial do loteamento.

A sub-bacia definida para o cenário 0 pode ser observada na Figura 4.10.

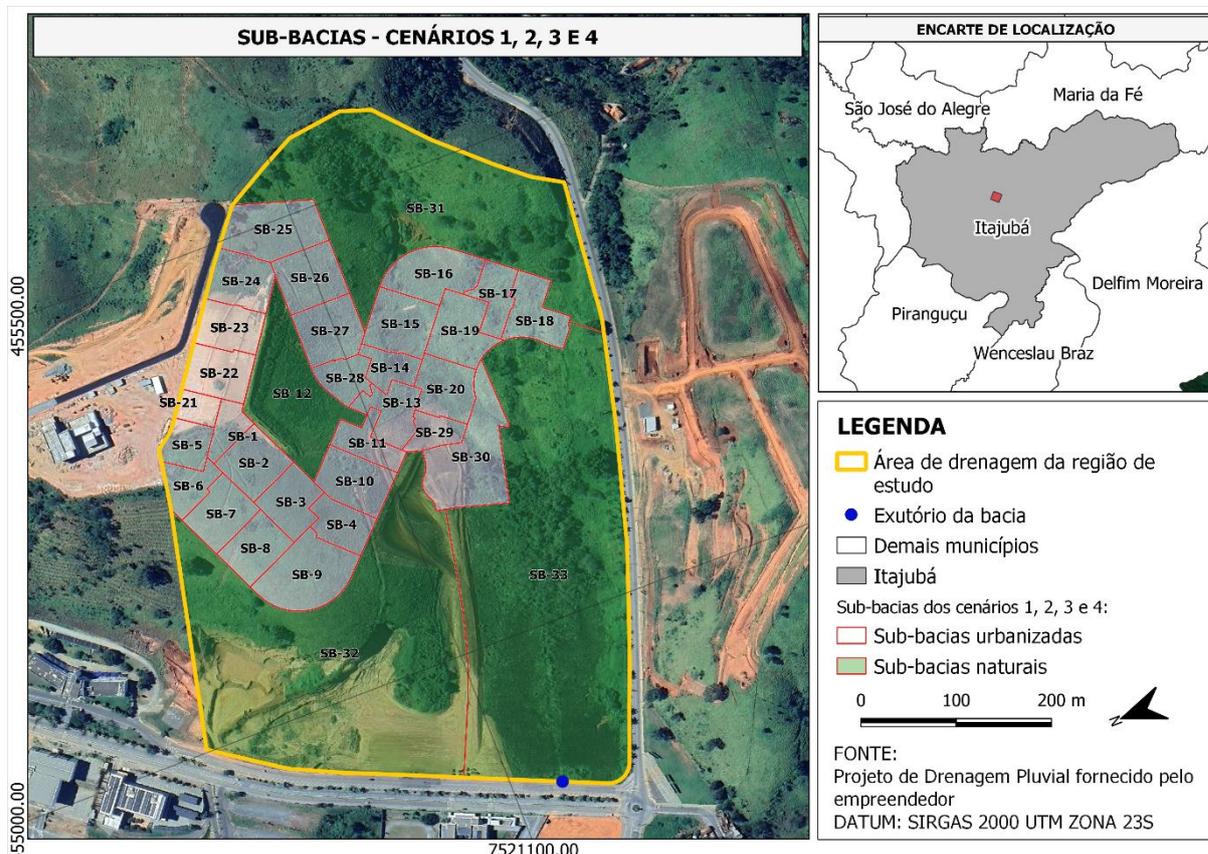
Figura 4.10 – Sub-bacias da área de estudo para o cenário 0



Fonte: Elaboração própria (2024)

As sub-bacias para os cenários 1, 2, 3 e 4 podem ser observadas na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Sub-bacias da área de estudo para os cenários 1, 2, 3 e 4



Fonte: Elaboração própria (2024)

A fim de se caracterizar as sub-bacias para inserção no modelo hidrológico, os seguintes parâmetros físicos foram definidos:

- Área (ha) de cada sub-bacia;

A área da sub-bacia para o cenário 0 pode ser observada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Sub-bacia do cenário 0

SUB-BACIA	ÁREA (ha)
Única	28,90

Fonte: Levantamento topográfico da área de estudo fornecido pelo empreendedor (2023)

As áreas das sub-bacias definidas pelo projeto de drenagem pluvial do loteamento para os cenários 1, 2, 3 e 4, podem ser observadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Sub-bacias dos cenários 1, 2, 3 e 4

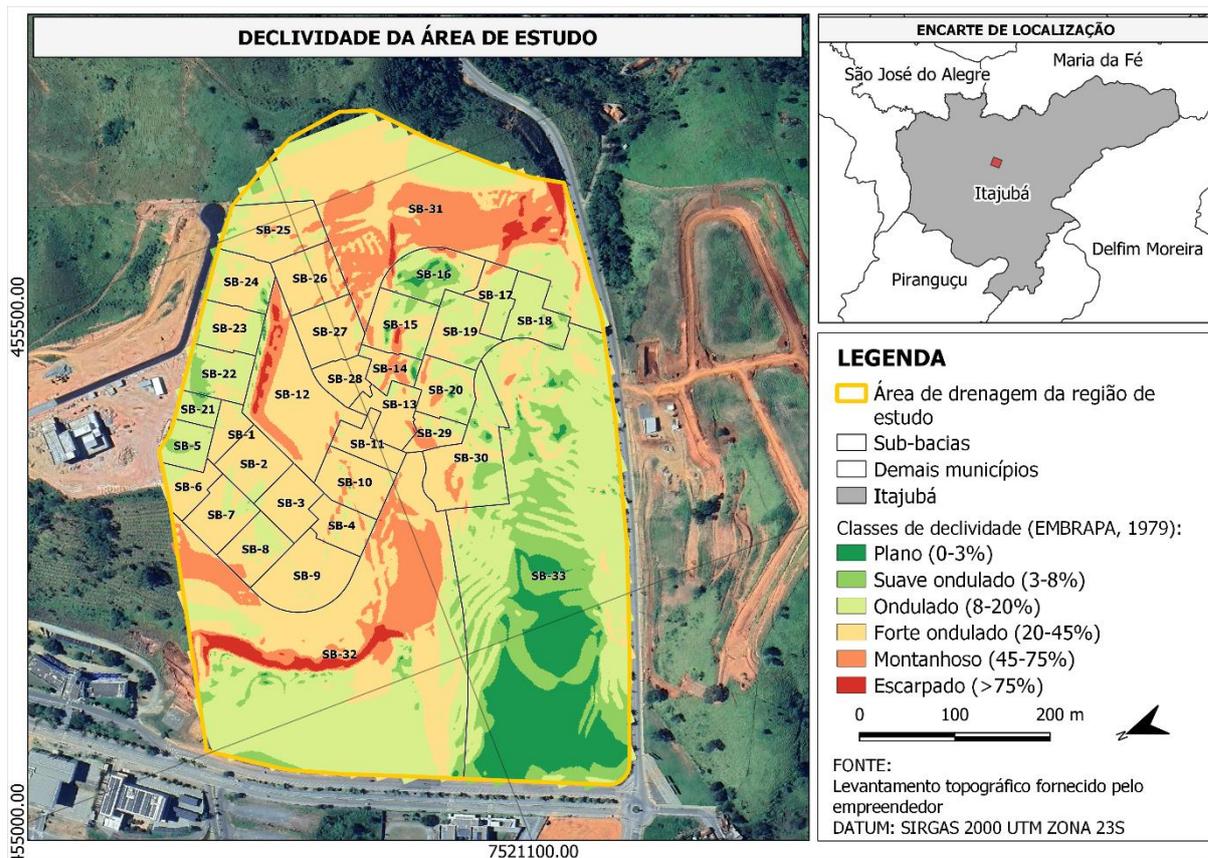
SUB-BACIA	ÁREA (ha)	SUB-BACIA	ÁREA (ha)
1	0,170	18	0,344
2	0,351	19	0,402
3	0,324	20	0,352
4	0,269	21	0,135
5	0,222	22	0,343
6	0,223	23	0,312
7	0,347	24	0,352
8	0,327	25	0,552
9	0,592	26	0,397
10	0,391	27	0,395
11	0,233	28	0,217
12	1,125	29	0,179
13	0,306	30	0,774
14	0,196	31	4,175
15	0,408	32	6,542
16	0,445	33	7,258
17	0,246		

Fonte: Projeto de drenagem pluvial do loteamento fornecido pelo empreendedor (2023)

- Declividade média da sub-bacia (%);

As declividades médias das sub-bacias foram definidas através do *software* QGis, em sua versão 3.28.13, por meio do levantamento topográfico fornecido pelo empreendedor. A Figura 4.12 apresenta o mapa de declividade da área de estudo, com base nos parâmetros de declividade definidos pela Embrapa (1979).

Figura 4.12 – Declividade da área de estudo



Fonte: Elaboração própria (2025)

A declividade média original da sub-bacia para o cenário 0 pode ser observada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Declividade média da sub-bacia do cenário 0

SUB-BACIA	DECLIVIDADE MÉDIA (%)
Única	24,43

Fonte: Levantamento topográfico da área de estudo fornecido pelo empreendedor (2023)

A declividade média original de cada sub-bacia, a qual serviu de referência para a análise de sensibilidade nos cenários 1, 2, 3 e 4 pode ser observada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Declividade média das sub-bacias dos cenários 1, 2, 3 e 4

SUB-BACIA	DECLIVIDADE MÉDIA (%)	SUB-BACIA	DECLIVIDADE MÉDIA (%)
1	26,33	18	14,45
2	27,61	19	17,67
3	27,20	20	22,14
4	32,48	21	11,12
5	10,76	22	15,63
6	24,72	23	18,63
7	26,59	24	21,09
8	26,77	25	26,43
9	28,29	26	33,42
10	34,05	27	31,91
11	31,19	28	29,12
12	42,87	29	29,97
13	32,30	30	22,75
14	31,95	31	40,13
15	25,93	32	29,85
16	16,52	33	8,70
17	19,15		

Fonte: Projeto de drenagem pluvial do loteamento fornecido pelo empreendedor (2023)

- Porcentagem de área impermeável de cada sub-bacia (%);

A porcentagem de área impermeável foi determinada a partir do parâmetro CN definido para cada cenário. Ressalta-se que cada sub-bacia possui uma área impermeável diferente pois as áreas das sub-bacias são distintas.

Para o cenário 0, não foram consideradas áreas impermeáveis.

- Coeficiente de rugosidade de *Manning* (n) das áreas permeáveis e impermeáveis e parâmetro CN;

O Coeficiente de rugosidade de *Manning* (n) foi determinado conforme Tabela 4.10, já o parâmetro CN, considerando condição II de umidade antecedente, foi definido conforme Tabela 4.2 explicitada no item 4.3.

Tabela 4.10 – Coeficiente n de Manning para escoamento em superfícies

SUPERFÍCIE	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014

SUPERFÍCIE	n
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
Cobertos de resíduos < 20%	0,06
Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Grama	
Curta, pradaria	0,15
Densa	0,24
Grama-bermudas	0,41
Floresta	
Vegetação rasteira leve	0,40
Vegetação rasteira densa	0,80

Fonte: McCuen *et al.* (1996 *apud* U.S. EPA, 2012)

- Porcentagem de solo impermeável isenta de armazenamento em depressão (%);

Para o parâmetro área impermeável sem armazenamento em depressão das sub-bacias urbanizadas, foi definido o percentual de 25%, conforme recomendado por Gironás *et al.* (2009 *apud* Barros *et al.*, 2016), para casos em que não há informações suficientes.

Para o cenário 0, esse percentual foi nulo, visto que foi considerado o terreno pré-urbanização e sem qualquer tipo de interferência antrópica.

- Largura da sub-bacia (m);

O parâmetro da largura da sub-bacia para as áreas de drenagem naturais (sub-bacia do cenário 0 e sub-bacias 12, 31, 32 e 33 dos demais cenários) seguiu a abordagem proposta por Guo e Urbonas (2007, *apud* U.S. EPA, 2012), a qual considera um fator de forma para representar as sub-bacias conforme configuração da Figura 4.13.

Figura 4.13 – Formato irregular de sub-bacia natural para cálculo de largura



Fonte: Guo e Urbonas (2007, apud U.S. EPA, 2012)

O fator de forma apresenta uma relação entre a largura média e o comprimento axial de uma área de drenagem, além de ser um indicativo para maior ou menor tendência de enchentes na região (Villela e Mattos, 1975). Esse índice pode ser obtido por meio da Equação 4.6.

$$X = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde, X é o fator de forma, A é a área da bacia hidrográfica e L o comprimento principal do canal de drenagem.

Entretanto, considerando o fator de forma para uma sub-bacia idealizada, aplica-se a Equação 4.7.

$$Y = \frac{2X(1,5-Z)(2K-X)}{2K-1} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde Y é o fator de forma para a sub-bacia idealizada e K o valor limite máximo para o fator de forma. Guo e Urbonas (2007, apud U.S. EPA, 2012) recomendam que K seja entre 4 e 6, e conforme recomendação de UDFCD (2007), foi adotado o valor de 4 para o presente estudo. O valor de Z corresponde ao fator de inclinação da sub-bacia, o qual deve ser calculado pela Equação 4.8 e seu valor deve estar compreendido entre 0,5 e 1,0.

$$Z = \frac{A_m}{A} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

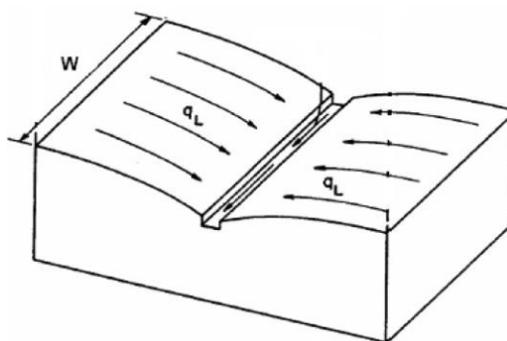
Onde A_m é a maior área da sub-bacia entre ambas as áreas de cada lado do talvegue principal e A é a área total.

Por fim, pode-se determinar a largura W para a sub-bacia através da Equação 4.9.

$$W = YL \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Para as sub-bacias urbanizadas inseridas nos cenários 1, 2, 3 e 4, o conceito de largura (W) foi definido como a largura física do escoamento superficial, conforme mostra a Figura 4.14.

Figura 4.14 – Representação da sub-bacia



Fonte: U.S. EPA (2012)

- Tempo de secagem do solo (dias);

Definido como o tempo necessário para o solo saturado secar completamente. Conforme sugerido por U.S. EPA (2012), os valores típicos variam entre 2 e 14 dias, desse modo, foi adotado o valor de 7 dias.

- Profundidade de armazenamento em depressão para áreas permeáveis e impermeáveis (mm);

Corresponde a profundidade máxima que a água pode acumular na sub-bacia antes de gerar o escoamento superficial, tanto para as áreas permeáveis quanto para as áreas impermeáveis.

Para as áreas permeáveis foi considerado o valor de 5,08mm, conforme valores de referência da Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Profundidade do armazenamento em depressão para áreas permeáveis

SUPERFÍCIE	ARMAZENAMENTO EM DEPRESSÃO (mm)
Superfícies impenetráveis	1,27 – 2,54
Gramados	2,54 – 5,08
Pastagem	5,08
Serrapilheira	7,62

Fonte: ASCE (1992 *apud* U.S. EPA, 2012)

Para as áreas impermeáveis, o parâmetro foi definido conforme Equação 4.10.

$$dp = 0,0303 * S^{-0,49} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Onde dp é a profundidade de armazenamento em depressão em superfícies impermeáveis (mm) e S a declividade média de cada sub-bacia (%).

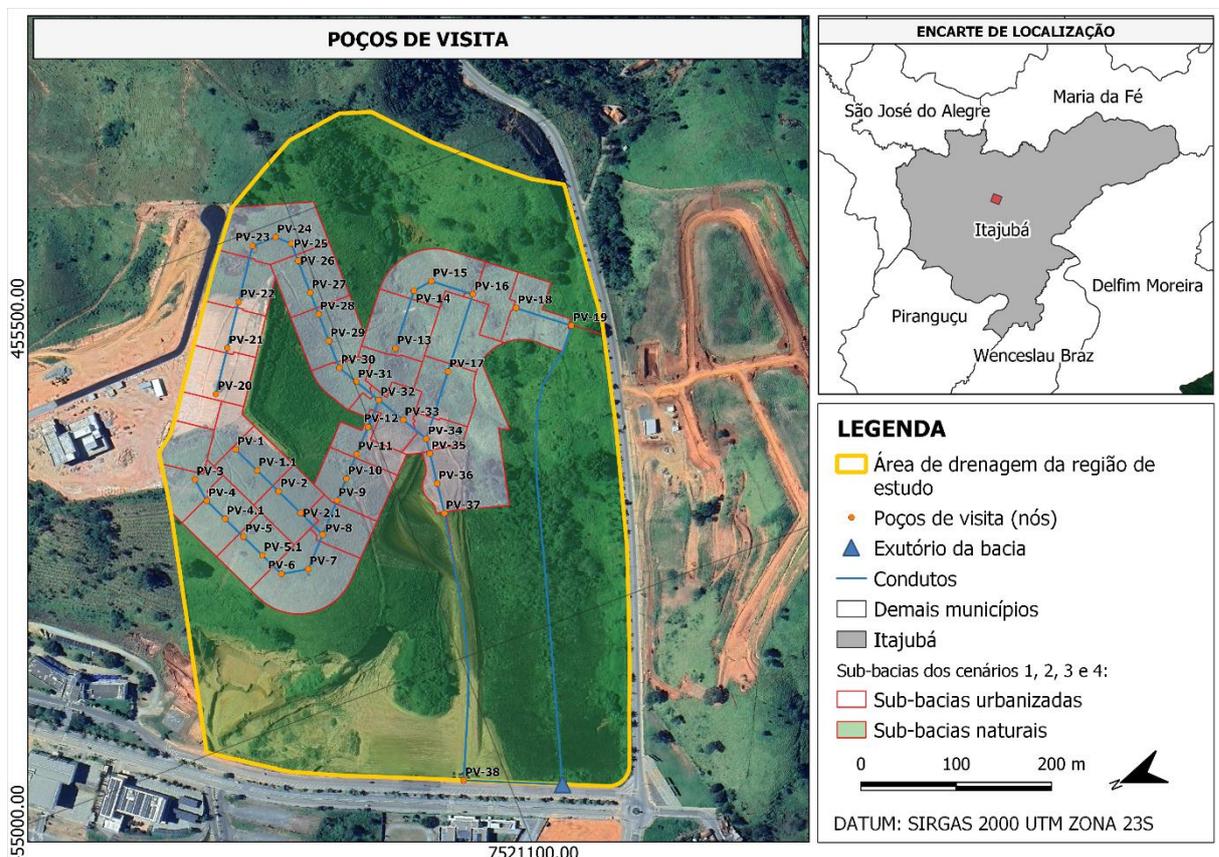
Para o cenário 0, esse parâmetro foi nulo.

4.6.3. Nós de conexão

Os nós de conexão foram definidos como os locais de encontro dos diferentes componentes do sistema de drenagem pluvial, ou seja, os poços de visita do projeto de drenagem pluvial do loteamento. Com relação a saída de água do sistema, o exutório da área de contribuição foi considerado como um nó com condição de contorno livre. Essa condição é determinada pelo valor mínimo entre a altura do escoamento crítico e a do escoamento normal no conduto conectado (U. S. EPA, 2012).

Os nós inseridos na modelagem podem ser observados na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Representação dos nós na modelagem hidrológica



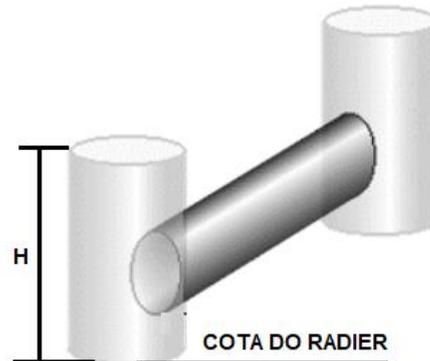
Fonte: Elaboração própria (2025)

Os parâmetros de entrada necessários para inserção no modelo foram:

- Cota do radier da estrutura física representada pelo nó (m);

Representa a cota de fundo do poço de visita, conforme mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16 – Representação da cota do radier e profundidade máxima de um poço de visita



Fonte: U.S. EPA (2012) modificado pelo autor

- Profundidade do radier em relação ao terreno (m).

Representa a profundidade do poço de visita, indicado pela letra H na Figura 4.16;

- Área de alagamento à superfície do nó (m²);

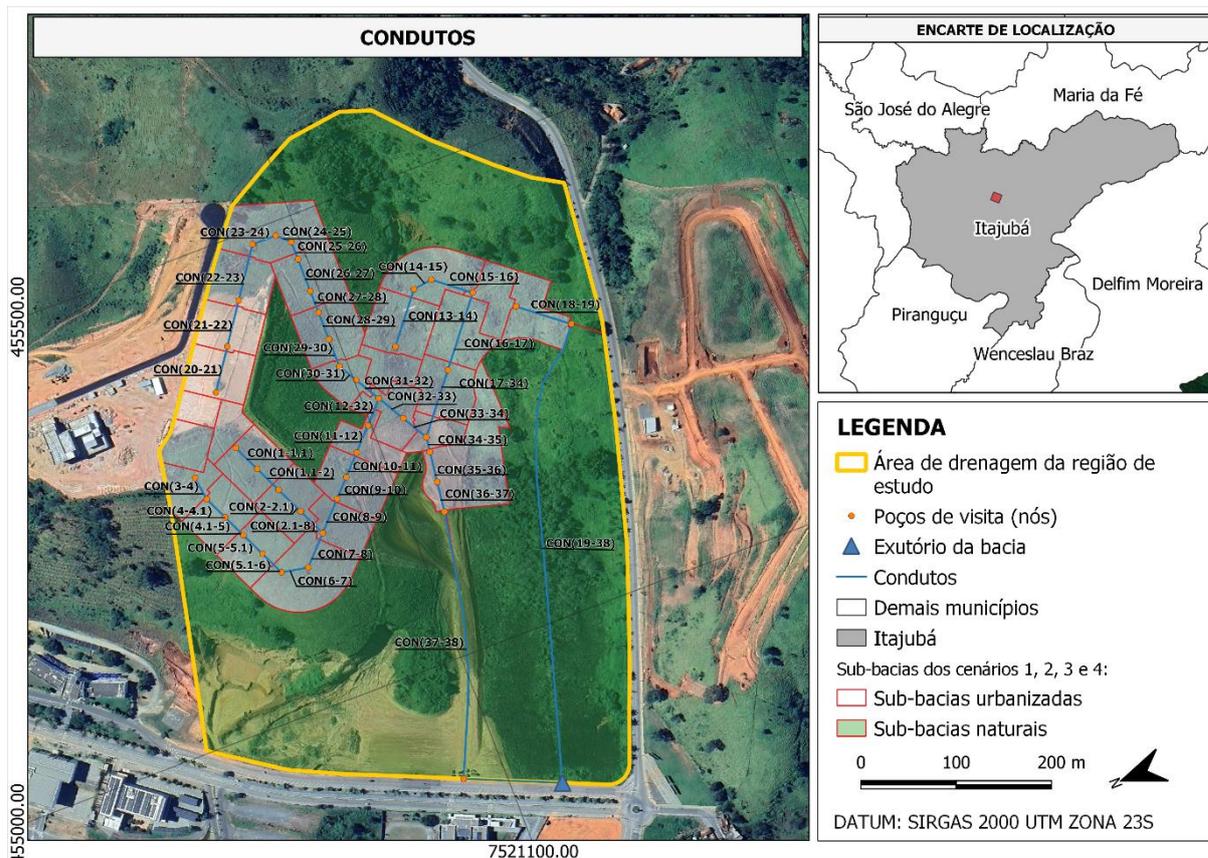
A área de alagamento à superfície do nó representa a área sobre o nó em que seja possível o alagamento em um evento de chuva. Para as simulações, não foram consideradas áreas de alagamento.

4.6.4. Condutos

Os condutos são responsáveis por conduzir a água pluvial de um nó até o outro, os quais foram representados na modelagem hidrológica como as manilhas dimensionadas no projeto de drenagem pluvial do empreendimento.

Os condutos inseridos na modelagem podem ser observados na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Representação dos condutos na modelagem hidrológica

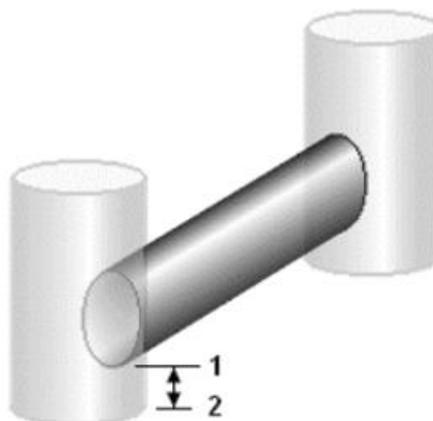


Fonte: Elaboração própria (2025)

Para a simulação, conforme determinado por U.S. EPA (2012), os seguintes parâmetros de entrada são necessários:

- Identificação dos nós de entrada e saída;
- *Offset* do nó de entrada e de saída;

Definida a convenção de profundidade (ou altura) para representar o offset dos nós, o qual pode ser especificado como a distância do ponto 2 (cota do radier do nó) até o ponto 1 (geratriz inferior do conduto), conforme ilustrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Representação do *offset* para o nó

Fonte: U.S. EPA (2012)

- Comprimento do conduto;
- Coeficiente de *Manning*;

O coeficiente *n* de *Manning* foi definido conforme o material constituinte da manilha, com base nos valores definidos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Coeficiente *n* de *Manning* para condutos fechados

SUPERFÍCIE	n
Tubulação cimento-amianto	0,011 – 0,015
Tijolo	0,013 – 0,017
Tubulação de ferro	
Cimento forrado e revestido	0,011 – 0,015
Concretos (monolítico)	
Formas lisas	0,012 – 0,014
Formas rugosas	0,015 – 0,017
Tubulação de concreto	0,011 – 0,015
Tubulação de metal corrugado (1/2-pol x 2.2/3-pol ranhuras)	
Liso	0,022 – 0,026
Ranhuras inversas	0,018 – 0,022
Revestimento asfáltico	0,011 – 0,015
Tubulação plástica (lisa)	0,011 – 0,015
Cerâmico	
Tubos	0,011 – 0,015
Chapas assembladas	0,013 – 0,017

Fonte: ASCE (1982 *apud* U.S. EPA, 2012)

Como todos os condutos inseridos no modelo são constituídos de concreto, foi adotado o valor de 0,013 para o coeficiente *n* de *Manning*.

- Geometria da seção transversal do conduto;

Conforme projeto de drenagem pluvial do empreendimento, todos os condutos são de seção transversal circular.

4.7. Vazão retida por lote

A vazão a ser retida por área de lote foi obtida a partir da vazão de pico para o cenário natural e as vazões de pico encontradas na simulação hidrológica de cada cenário e intervalo de declividade avaliado. Para isso, inicialmente foi definida a vazão excedente à condição natural em cada cenário através da Equação 4.11.

$$Q_e = Q_{Cn} - Q_{nat} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Onde Q_e é a vazão excedente à condição natural em m^3/s , Q_{Cn} a vazão em m^3/s no exutório para cada cenário e condição de declividade avaliada e Q_{nat} a vazão para o cenário 0.

Para a definição da vazão unitária a ser retida por área de lote, foi necessário dividir a vazão excedente pela área total urbanizada de cada cenário, conforme Equação 4.12.

$$Q_{Ret,Cn} = \frac{Q_e}{A_{urb}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

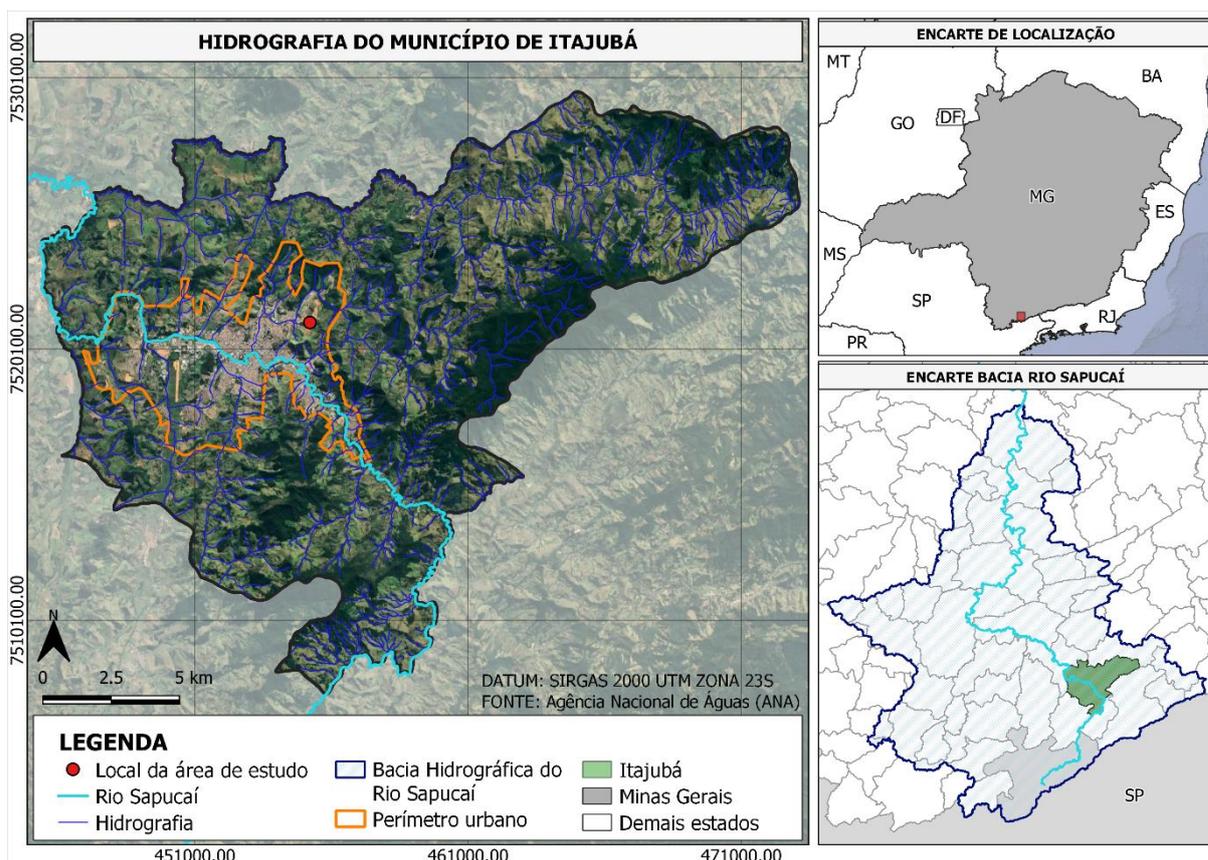
Onde Q_{Ret} é a vazão em m^3/s a ser retida por área de lote para cada cenário avaliado e A_{urb} o somatório das áreas em hectare das sub-bacias urbanizadas para o respectivo cenário avaliado.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterização da área de estudo

O município de Itajubá está localizado na porção Sul do Estado de Minas Gerais e pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, conforme mostra a Figura 5.1. O curso d'água que atravessa o município conta com o Ribeirão Anhumas, Ribeirão Piranguçu, Ribeirão José Pereira e Ribeirão Água Preta como seus principais afluentes. Por se tratar de uma região com topografia de vales encaixados, o fato de o município ter se desenvolvido em uma planície de inundação colabora para a ocorrência de efeito de remanso e enchentes no município (MARCIANO, 2019).

Figura 5.1 - Hidrografia do município de Itajubá

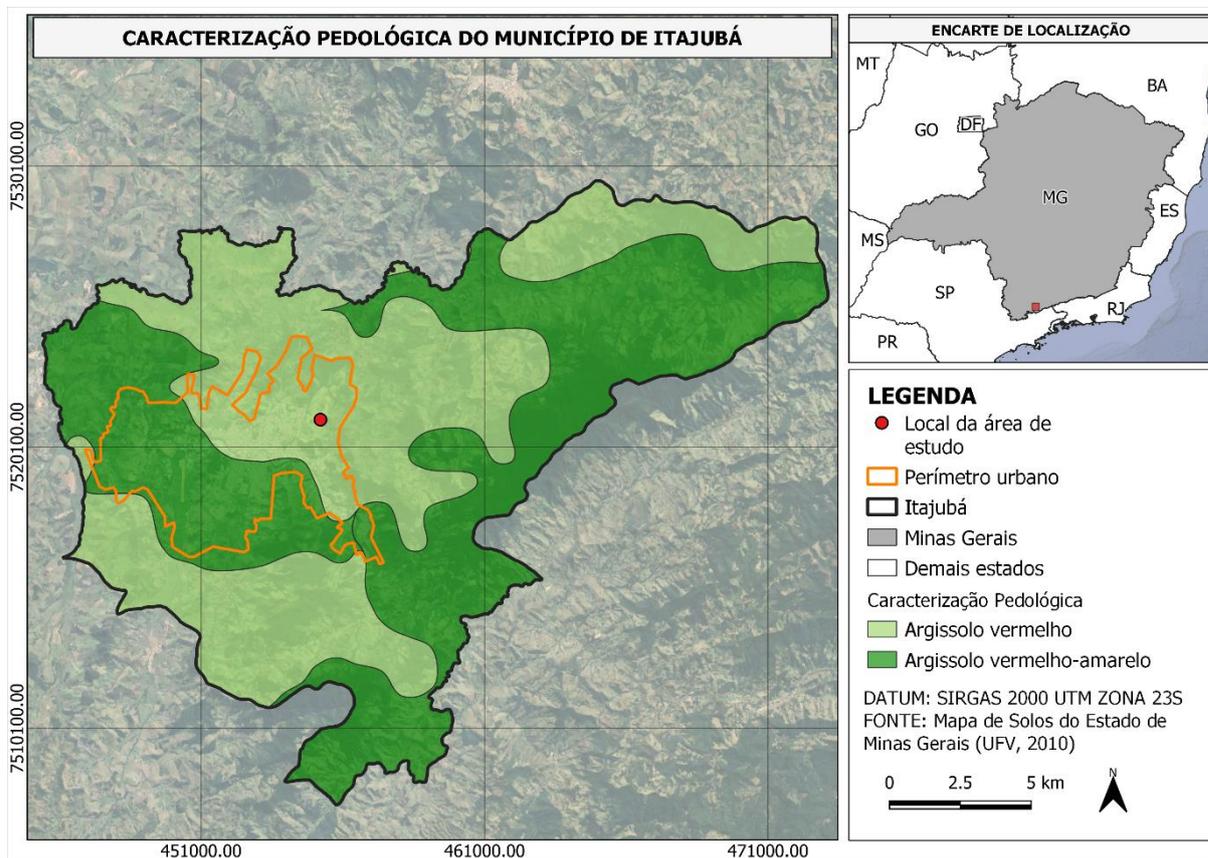


Fonte: Elaboração própria (2025)

Com relação a caracterização pedológica de Itajubá, apresentada na Figura 5.2, pode-se notar que são predominantes o argissolo vermelho e o argissolo vermelho-amarelo, enquanto na área de contribuição do estudo predomina-se exclusivamente o argissolo vermelho. Assim,

conforme definido por Sartori (2010), o solo da área de contribuição se enquadra no grupo hidrológico B.

Figura 5.2 - Pedologia do município de Itajubá



Fonte: Elaboração própria (2025)

A fim de se caracterizar o município com relação à infraestrutura e gestão do sistema de drenagem urbana, as informações obtidas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para o ano de 2022, referentes à Infraestrutura podem ser observadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados do SNIS referente à Infraestrutura para Itajubá

INFRAESTRUTURA	
Existe Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas	Não
Existe cadastro técnico de obras lineares no município?	Sim
Qual é o tipo de sistema de Drenagem Urbana?	Exclusivo ⁽¹⁾
Extensão total de vias públicas urbanas do município:	306,18
Extensão total de vias públicas urbanas com pavimento e meio-fio (ou	302,68
Quantidade de bocas de lobo existentes no município:	3.061

INFRAESTRUTURA	
Quantidade de bocas de leão ou bocas de lobo múltiplas (duas ou mais	250
Quantidade de poços de visita (PV) existentes no município:	573
Extensão total de vias públicas urbanas com redes ou canais de águas	150,9
Existem vias públicas urbanas com soluções de drenagem natural (faixas	Não
Existe serviço de dragagem ou desassoreamento dos cursos d'água	Sim
Existem parques lineares em áreas urbanas?	Sim
Existe algum tipo de tratamento das águas pluviais?	Não existe tratamento

(1) 100% do sistema de drenagem é destinado exclusivamente às águas pluviais.

Fonte: SNIS (2022)

As informações referentes à Gestão de Riscos podem ser observadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados do SNIS referente à Gestão de Riscos para Itajubá

GESTÃO DE RISCOS	
Existem sistemas de alerta de riscos hidrológicos (alagamentos, enxurradas,	Sim
Existe cadastro ou demarcação de marcas históricas de inundações?	Sim
Existe mapeamento de áreas de risco de inundação dos cursos d'água urbanos?	Sim
Tempo de recorrência (ou período de retorno) adotado para o mapeamento	5 anos
Quantidade de domicílios sujeitos a risco de inundação	9.000
Quantidade de enxurradas, alagamentos e inundações nos últimos 5 anos	9

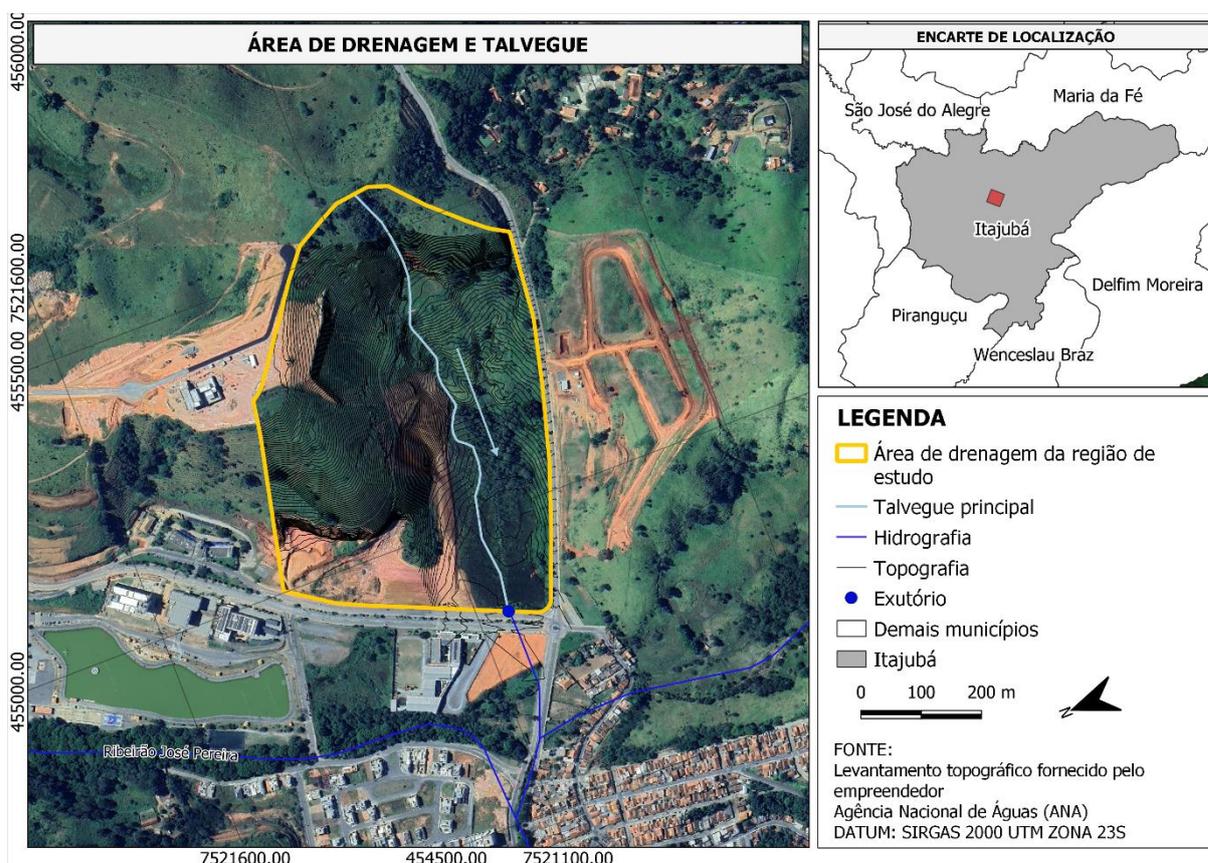
Fonte: SNIS (2022)

Os dados fornecidos pelo SNIS são disponibilizados pelos próprios gestores municipais e, para o caso do município de Itajubá, a Secretaria Municipal de Obras é responsável pela inserção na plataforma.

5.2. Caracterização da área de contribuição

A área de contribuição delimitada para o estudo, referente às condições naturais, juntamente com o seu talvegue pode ser observada na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Área de contribuição e talvegue principal



Fonte: Elaboração própria (2025)

A área de drenagem apresenta 0,29 km² e o seu talvegue principal possui comprimento aproximado de 784 m, compreendido entre o ponto mais alto da bacia e o seu exutório, com declividade média equivalente de 0,046 m/m. A partir disso, foi possível obter os dados do tempo de concentração para as fórmulas de Carter, Schaake e Kirpich, explicitados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Tempos de concentração calculados

METODOLOGIA	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (min)
Kirpich	10,78
Carter	12,75
Schaake	9,18

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os resultados obtidos para o tempo de concentração foram utilizados para definir a duração da chuva de projeto e identificar a duração crítica. Portanto, foi definido o valor de 10 minutos para a duração da chuva a ser utilizada nas simulações hidrológicas no SWMM.

5.3. Chuva de Projeto

A partir da realização da desagregação da precipitação diária dos dados de chuva disponibilizados pela estação pluviométrica São João de Itajubá (2245083), foi possível obter os quantis de chuva explicitados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Quantis de chuva obtidos

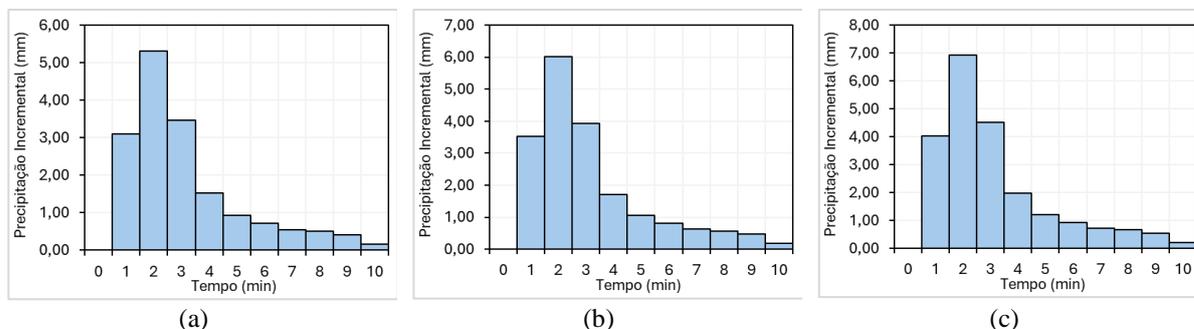
DURAÇÃO DA CHUVA	PRECIPITAÇÃO (mm)		
	TEMPO DE RETORNO (ANOS)		
	5	10	25
6 min	10,40	11,80	13,60
10 min	16,70	18,90	21,70
15 min	21,70	24,50	28,10
20 min	25,20	28,50	32,60
30 min	30,30	34,20	39,00
1 hora	38,80	43,80	50,00
2 horas	50,50	57,20	65,60
3 horas	57,40	65,10	74,70

Fonte: Elaboração própria (2024)

Os valores obtidos para os quantis de chuva de diferentes durações e Tempos de Retorno foram discretizados conforme metodologia de Huff (1967), considerada a curva do primeiro quartil e 50 % de probabilidade de ocorrência.

Na Figura 5.4 podem ser observados os hietogramas para as chuvas com duração de 10 minutos discretizada em 1 minuto para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, conforme metodologia descrita.

Figura 5.4 – Hietograma típico para o 1º quartil de Huff para Tempos de Retorno de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 anos

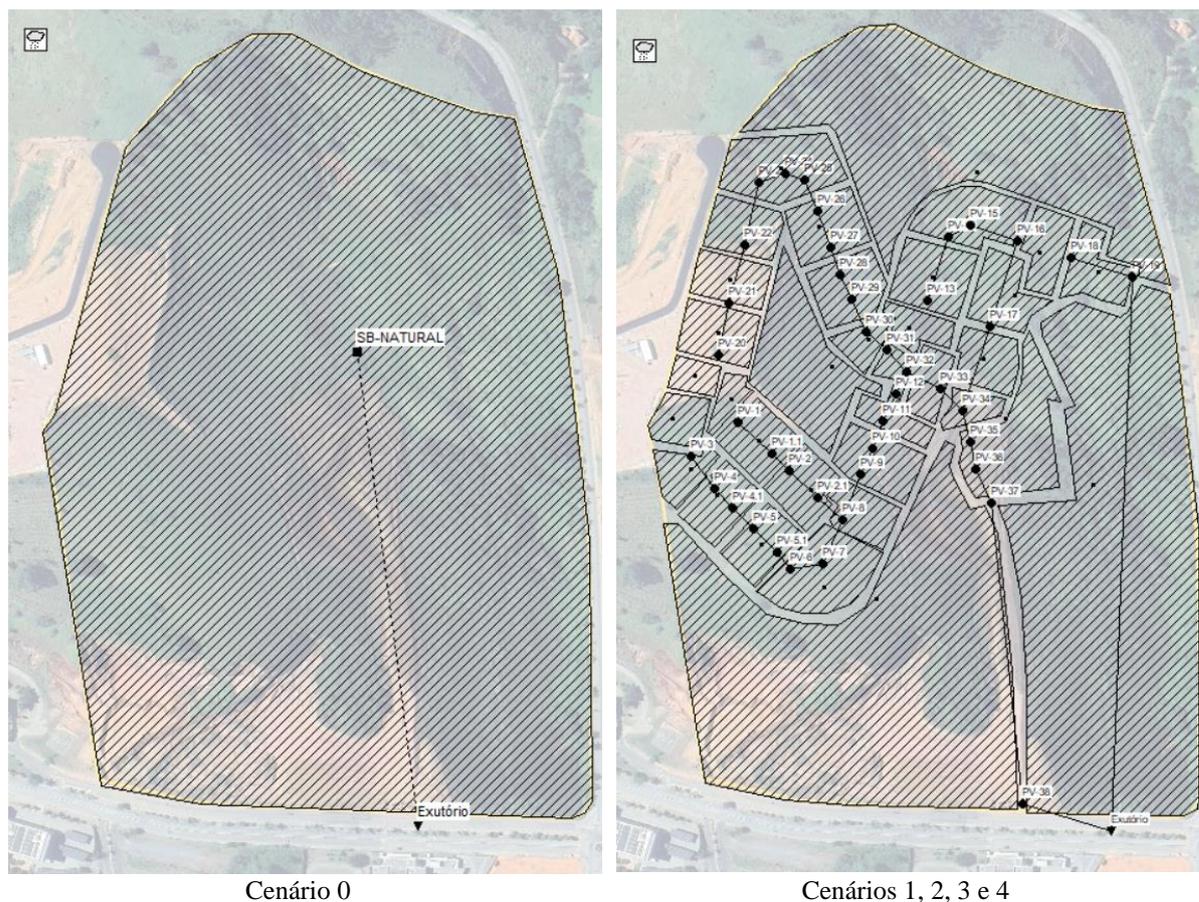


Fonte: Elaboração própria (2024)

5.4. Simulação Hidrológica no SWMM

A simulação hidrológica foi realizada para as sub-bacias definidas e apresentadas no item 4.6.2. A Figura 5.5 ilustra a representação gráfica dos cenários simulados no software SWMM.

Figura 5.5 – Representação gráfica dos cenários simulados no SWMM



Fonte: Elaboração própria (2025)

5.4.1. Dados de entrada

A partir do traçado das sub-bacias no modelo hidrológico foi realizada a inserção dos dados de entrada para cada componente da simulação. A Tabela 5.5 apresenta os dados de entrada da sub-bacia única definida para o cenário 0.

Tabela 5.5 – Dados de entrada da sub-bacia para o cenário 0

SUB-BACIA	ÁREA (ha)	LARGURA (m)	DECLIV. (%)	A.I. (%)	n A.I.	n A.P.	P.ARM. A.I. (mm)	P.ARM. A.P. (mm)	A.I. SEM ARMAZ. (%)	CN	TS (dias)
Natural	28,9	675,18	24,43	-	-	0,15	-	5,08	-	79	7

n A.I. – Coeficiente n de *Manning* para áreas impermeáveis

n A.P. – Coeficiente n de *Manning* para áreas permeáveis

P.ARM. A.I. – Profundidade do armazenamento em depressão para as áreas impermeáveis

P.ARM. A.P. – Profundidade do armazenamento em depressão para as áreas permeáveis

TS – Tempo seco

Fonte: Elaboração própria (2025)

Como o cenário 0 representa a situação de pré-urbanização da área objeto de estudo, logo não foram consideradas áreas impermeáveis. Para o parâmetro CN, definido conforme Tabela 4.2, foi escolhido o valor de 79 para representar a área natural, por caracterizar pastagem em más condições.

Os dados de entrada para os cenários 1, 2, 3 e 4 podem ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Dados de entrada da sub-bacia para os cenários 1, 2, 3 e 4

SUB-BACIA	ÁREA (ha)	LARGURA (m)	n A.I.	n A.P.	P.ARM. A.P. (mm)	A.I. SEM ARMAZ.	TS (dias)
1	0,170	43,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
2	0,351	58,50	0,15	0,011	5,08	25,00	7
3	0,324	60,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
4	0,269	42,75	0,15	0,011	5,08	25,00	7
5	0,222	48,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
6	0,223	66,20	0,15	0,011	5,08	25,00	7
7	0,347	50,90	0,15	0,011	5,08	25,00	7
8	0,327	49,50	0,15	0,011	5,08	25,00	7
9	0,592	90,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
10	0,391	53,25	0,15	0,011	5,08	25,00	7
11	0,233	29,20	0,15	0,011	5,08	25,00	7
12	1,125	155,10	-	0,011	5,08	25,00	7
13	0,306	71,65	0,15	0,011	5,08	25,00	7
14	0,196	45,30	0,15	0,011	5,08	25,00	7
15	0,408	63,20	0,15	0,011	5,08	25,00	7
16	0,445	86,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
17	0,246	36,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
18	0,344	65,10	0,15	0,011	5,08	25,00	7
19	0,402	71,90	0,15	0,011	5,08	25,00	7
20	0,352	60,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
21	0,135	48,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
22	0,343	50,60	0,15	0,011	5,08	25,00	7
23	0,312	48,20	0,15	0,011	5,08	25,00	7
24	0,352	55,40	0,15	0,011	5,08	25,00	7
25	0,552	85,50	0,15	0,011	5,08	25,00	7

SUB-BACIA	ÁREA (ha)	LARGURA (m)	n A.I.	n A.P.	P.ARM. A.P. (mm)	A.I. SEM ARMAZ.	TS (dias)
26	0,397	60,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
27	0,395	60,00	0,15	0,011	5,08	25,00	7
28	0,217	56,75	0,15	0,011	5,08	25,00	7
29	0,179	45,10	0,15	0,011	5,08	25,00	7
30	0,774	67,90	0,15	0,011	5,08	25,00	7
31	4,175	228,81	-	0,011	5,08	25,00	7
32	6,542	349,54	-	0,011	5,08	25,00	7
33	7,258	317,60	-	0,011	5,08	25,00	7

n A.I. – Coeficiente n de *Manning* para áreas impermeáveis

n A.P. – Coeficiente n de *Manning* para áreas permeáveis

P.ARM. A.P. – Profundidade do armazenamento em depressão para as áreas permeáveis

TS – Tempo seco

Fonte: Elaboração própria (2025)

Como forma de facilitar o entendimento da dinâmica do escoamento superficial de cada sub-bacia, a Tabela 5.7 apresenta o destino do escoamento superficial de cada sub-bacia.

Tabela 5.7 – Indicação dos Poços de Visita (PV) do destino do escoamento superficial de cada sub-bacia

SUB-BACIA	PV DE DESTINO	SUB-BACIA	PV DE DESTINO	SUB-BACIA	PV DE DESTINO
1	1	12	12	23	22
2	2	13	34	24	23
3	8	14	13	25	26
4	9	15	14	26	28
5	3	16	16	27	30
6	4	17	18	28	32
7	5	18	19	29	35
8	6	19	17	30	37
9	8	20	34	31	19
10	11	21	20	32	38
11	32	22	21	33	38

Fonte: Elaboração própria (2025)

Os valores do parâmetro CN e a porcentagem de área impermeável das sub-bacias foram variados para cada um dos cenários, conforme explicitado no item 4.4. Os respectivos valores adotados podem ser observados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores de CN e A. I. (%) para os cenários 1, 2, 3 e 4

SUB-BACIA	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		CENÁRIO 3		CENÁRIO 4	
	CN	A.I. (%)						
1	80,00	5,25	85,00	31,60	90,00	57,90	95,00	84,19

SUB-BACIA	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		CENÁRIO 3		CENÁRIO 4	
	CN	A.I. (%)						
2	80,00	5,24	85,00	31,57	90,00	57,90	95,00	84,21
3	80,00	5,26	85,00	31,60	90,00	57,90	95,00	84,21
4	80,00	5,26	85,00	31,55	90,00	57,92	95,00	84,21
5	80,00	5,27	85,00	31,60	90,00	57,88	95,00	84,20
6	80,00	5,27	85,00	31,57	90,00	57,92	95,00	84,22
7	80,00	5,27	85,00	31,58	90,00	57,89	95,00	84,22
8	80,00	5,29	85,00	31,57	90,00	57,91	95,00	84,18
9	80,00	5,28	85,00	31,56	90,00	57,89	95,00	84,21
10	80,00	5,26	85,00	31,59	90,00	57,87	95,00	84,23
11	80,00	5,26	85,00	31,57	90,00	57,91	95,00	84,21
12*	79,00	-	79,00	-	79,00	-	79,00	-
13	80,00	5,27	85,00	31,59	90,00	57,91	95,00	84,19
14	80,00	5,25	85,00	31,60	90,00	57,89	95,00	84,18
15	80,00	5,25	85,00	31,58	90,00	57,88	95,00	84,19
16	80,00	5,25	85,00	31,56	90,00	57,88	95,00	84,20
17	80,00	5,29	85,00	31,57	90,00	57,88	95,00	84,20
18	80,00	5,27	85,00	31,56	90,00	57,91	95,00	84,20
19	80,00	5,25	85,00	31,57	90,00	57,89	95,00	84,21
20	80,00	5,26	85,00	31,57	90,00	57,92	95,00	84,20
21	80,00	5,25	85,00	31,57	90,00	57,89	95,00	84,20
22	80,00	5,28	85,00	31,58	90,00	57,88	95,00	84,21
23	80,00	5,27	85,00	31,56	90,00	57,89	95,00	84,21
24	80,00	5,26	85,00	31,57	90,00	57,90	95,00	84,23
25	80,00	5,24	85,00	31,56	90,00	57,90	95,00	84,20
26	80,00	5,25	85,00	31,60	90,00	57,90	95,00	84,23
27	80,00	5,27	85,00	31,59	90,00	57,92	95,00	84,20
28	80,00	5,27	85,00	31,60	90,00	57,88	95,00	84,21
29	80,00	5,28	85,00	31,55	90,00	57,88	95,00	84,21
30	80,00	5,28	85,00	31,56	90,00	57,88	95,00	84,23
31*	79,00	-	79,00	-	79,00	-	79,00	-
32*	79,00	-	79,00	-	79,00	-	79,00	-
33*	79,00	-	79,00	-	79,00	-	79,00	-

* Representa as sub-bacias sem lotes, logo os valores do parâmetro CN não foram variados nos cenários.
Fonte: Elaboração própria (2025)

Nota-se que as sub-bacias naturais (12, 31, 32 e 33) não tiveram seus valores de CN alterados nos cenários, conforme premissa adotada.

Os cenários foram subdivididos de modo que as declividades fossem variadas para cada um dos cenários avaliados, conforme classificação da Embrapa (1979). Os valores das declividades e das profundidades dos armazenamentos em depressão das áreas impermeáveis para cada uma das sub-bacias podem ser observados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores de declividade e profundidades dos armazenamentos em depressão para as áreas impermeáveis

SUB-BACIA	DECLIV. ORIGINAL		PREDOMINENTEMENTE ONDULADO		PREDOMINENTEMENTE SUAVE ONDULADO		PREDOMINENTEMENTE PLANO	
	DECLIV. (%)	P.ARM. A.I (mm)	DECLIV. (%)	P.ARM. A.I (mm)	DECLIV. (%)	P.ARM. A.I (mm)	DECLIV. (%)	P.ARM. A.I (mm)
1	26,33	0,15	16,33	0,20	11,33	0,23	6,33	0,31
2	27,61	0,15	17,61	0,19	12,61	0,22	7,61	0,28
3	27,20	0,15	17,20	0,19	12,20	0,23	7,20	0,29
4	32,48	0,14	22,48	0,17	17,48	0,19	12,48	0,22
5	10,76	0,24	0,76	0,88	0,76	0,88	0,76	0,88
6	24,72	0,16	14,72	0,21	9,72	0,25	4,72	0,36
7	26,59	0,15	16,59	0,19	11,59	0,23	6,59	0,31
8	26,77	0,15	16,77	0,19	11,77	0,23	6,77	0,30
9	28,29	0,15	18,29	0,19	13,29	0,22	8,29	0,27
10	34,05	0,14	24,05	0,16	19,05	0,18	14,05	0,21
11	31,19	0,14	21,19	0,17	16,19	0,20	11,19	0,24
12	42,87	0,12	42,87	0,12	42,87	0,12	42,87	0,12
13	32,30	0,14	22,30	0,17	17,30	0,19	12,30	0,23
14	31,95	0,14	21,95	0,17	16,95	0,19	11,95	0,23
15	25,93	0,16	15,93	0,20	10,93	0,24	5,93	0,32
16	16,52	0,19	6,52	0,31	1,52	0,63	1,52	0,63
17	19,15	0,18	9,15	0,26	4,15	0,38	4,15	0,38
18	14,45	0,21	4,45	0,37	4,45	0,37	4,45	0,37
19	17,67	0,19	7,67	0,28	2,67	0,48	2,67	0,48
20	22,14	0,17	12,14	0,23	7,14	0,29	2,14	0,53
21	11,12	0,24	1,12	0,73	1,12	0,73	1,12	0,73
22	15,63	0,20	5,63	0,33	0,63	0,96	0,63	0,96
23	18,63	0,18	8,63	0,27	3,63	0,41	3,63	0,41
24	21,09	0,17	11,09	0,24	6,09	0,32	1,09	0,74
25	26,43	0,15	16,43	0,20	11,43	0,23	6,43	0,31
26	33,42	0,14	23,42	0,16	18,42	0,18	13,42	0,22
27	31,91	0,14	21,91	0,17	16,91	0,19	11,91	0,23
28	29,12	0,15	19,12	0,18	14,12	0,21	9,12	0,26
29	29,97	0,15	19,97	0,18	14,97	0,20	9,97	0,25
30	22,75	0,17	12,75	0,22	7,75	0,28	2,75	0,47
31	40,13	0,13	40,13	0,13	40,13	0,13	40,13	0,13
32	29,85	0,15	29,85	0,15	29,85	0,15	29,85	0,15
33	8,70	0,27	8,70	0,27	8,70	0,27	8,70	0,27

P.ARM. A.I. – Profundidade do armazenamento em depressão para as áreas impermeáveis

Fonte: Elaboração própria (2025)

A Tabela 5.10 apresenta os dados de entrada no modelo SWMM para os nós.

Tabela 5.10 – Dados de entrada para os nós

NÓ	COTA DO RADIER (m)	PROF. MÁXIMA (m)	NÓ	COTA DO RADIER (m)	PROF. MÁXIMA (m)
PV-1	936,60	4,80	PV-19	874,60	3,00
PV-1.1	930,60	4,40	PV-20	945,00	1,80
PV-2	924,10	4,90	PV-21	942,00	1,80
PV-2.1	918,50	4,00	PV-22	939,00	1,80
PV-3	943,00	3,00	PV-23	930,50	4,50
PV-4	937,70	4,30	PV-24	926,20	3,60
PV-4.1	932,30	4,30	PV-25	922,20	4,00
PV-5	926,90	4,30	PV-26	917,20	5,00
PV-5.1	921,30	4,30	PV-27	911,00	4,00
PV-6	918,00	2,00	PV-28	905,60	4,40
PV-7	916,50	2,00	PV-29	899,80	4,20
PV-8	912,40	4,60	PV-30	893,90	4,10
PV-9	906,00	4,00	PV-31	888,40	4,10
PV-10	900,00	5,00	PV-32	883,00	4,00
PV-11	894,70	4,00	PV-33	877,40	5,00
PV-12	888,60	4,60	PV-34	874,00	3,00
PV-13	884,80	1,80	PV-35	873,40	3,60
PV-14	884,20	1,80	PV-36	870,40	3,60
PV-15	883,80	2,00	PV-37	868,15	1,70
PV-16	879,20	1,80	PV-38	847,00	2,00
PV-17	877,00	1,80	Exutório	840,00	-
PV-18	877,90	1,80			

Fonte: Elaboração própria (2025)

A Tabela 5.11 apresenta os dados de entrada no modelo SWMM para os condutos. Todos os condutos possuem geometria circular com material em concreto, logo foi considerado o valor do coeficiente *n* de *Manning* de 0,013, conforme Tabela 4.12. Além disso, o offset de entrada para todos os condutos foi zero, visto que os poços de visita não possuem degraus a montante do conduto.

Tabela 5.11 – Dados de entrada para os condutos

CONDUTO	DIMENSÃO (m)	COMPRIMENTO (m)	OFFSET DE SAÍDA (m)	CONDUTO	DIMENSÃO (m)	COMPRIMENTO (m)	OFFSET DE SAÍDA (m)
CON(1-1.1)	0,60	31,50	2,80	CON(18-19)	0,60	61,00	0,00
CON(1.1-2)	0,60	31,50	3,30	CON(19-38)	0,60	493,60	0,00
CON(2-2.1)	0,60	32,50	2,40	CON(20-21)	0,60	50,00	0,00
CON(2.1-8)	0,60	32,50	2,80	CON(21-22)	0,60	50,00	0,00
CON(3-4)	0,40	25,87	2,70	CON(22-23)	0,60	61,07	2,70
CON(4-4.1)	0,60	26,95	2,70	CON(23-24)	0,60	25,97	1,80
CON(4.1-5)	0,60	26,95	2,70	CON(24-25)	0,60	17,82	2,20
CON(5-5.1)	0,60	28,04	2,70	CON(25-26)	0,60	19,52	3,20
CON(5.1-6)	0,60	28,04	0,40	CON(26-27)	0,60	36,00	2,60

CONDUTO	DIMENSÃO (m)	COMPRIMENTO (m)	OFFSET DE SAÍDA (m)
CON(6-7)	0,60	28,50	0,00
CON(7-8)	0,60	39,52	2,80
CON(8-9)	0,60	39,00	2,50
CON(9-10)	0,60	25,00	3,50
CON(10-11)	0,60	28,00	2,50
CON(11-12)	0,60	31,00	3,10
CON(12-32)	0,60	30,86	2,50
CON(13-14)	0,60	63,98	0,00
CON(14-15)	0,60	20,83	0,00
CON(15-16)	0,60	45,73	0,00
CON(16-17)	0,60	85,71	0,00
CON(17-34)	0,60	74,59	0,00

CONDUTO	DIMENSÃO (m)	COMPRIMENTO (m)	OFFSET DE SAÍDA (m)
CON(27-28)	0,60	24,37	3,00
CON(28-29)	0,60	30,30	2,80
CON(29-30)	0,60	30,35	2,70
CON(30-31)	0,60	22,80	2,80
CON(31-32)	0,60	30,79	2,50
CON(32-33)	0,80	33,25	3,20
CON(33-34)	0,80	31,38	1,20
CON(34-35)	0,80	15,99	0,00
CON(35-36)	0,80	32,50	1,80
CON(36-37)	0,80	32,50	0,00
CON(37-38)	1,00	282,82	0,10

Fonte: Elaboração própria (2025)

5.5. Cenários simulados

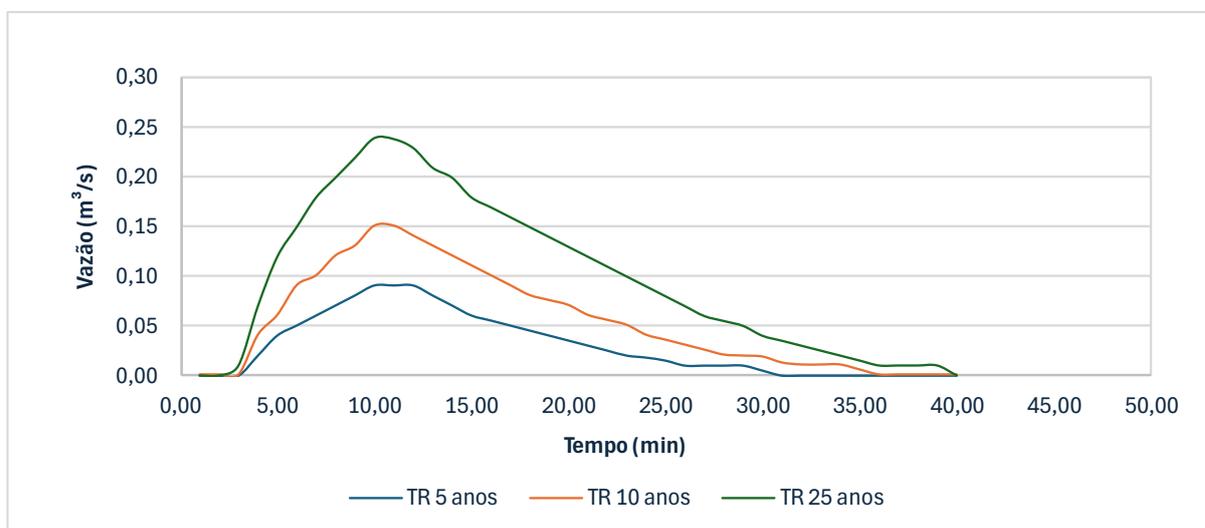
Os cenários foram simulados para Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos com durações da chuva de projeto de 10 minutos. Para todas as simulações, os erros de continuidade e de propagação foram inferiores a 5%, considerados aceitáveis para o tipo de simulação realizada.

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos para cada cenário avaliado, representados pelos hidrogramas no exutório da área de contribuição.

5.5.1. Cenário 0

A Figura 5.6 apresenta o hidrograma no exutório da sub-bacia natural para o cenário 0 simulado para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos.

Figura 5.6 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 0 para Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos



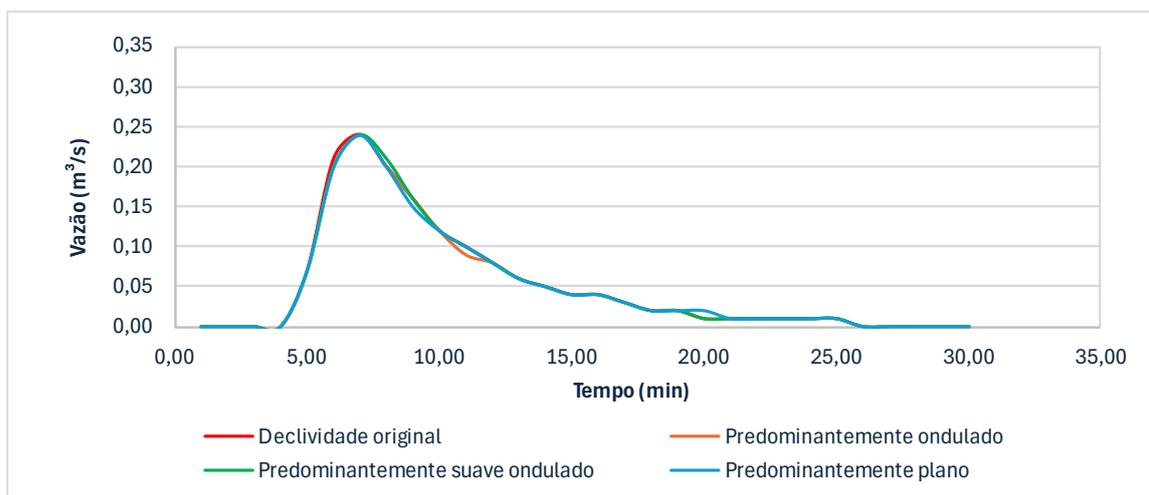
Fonte: Elaboração própria (2025)

Nota-se que a vazão de pico para o menor TR é de 0,09 m³/s, enquanto para o TR de 10 anos há um aumento de aproximadamente 67% na vazão afluyente no exutório. Já para o TR de 25 anos, esse aumento com relação a vazão da menor recorrência avaliada é de 167%. Essas vazões foram a referência para o cálculo das vazões a serem retidas por área de lote.

5.5.2. Cenário 1

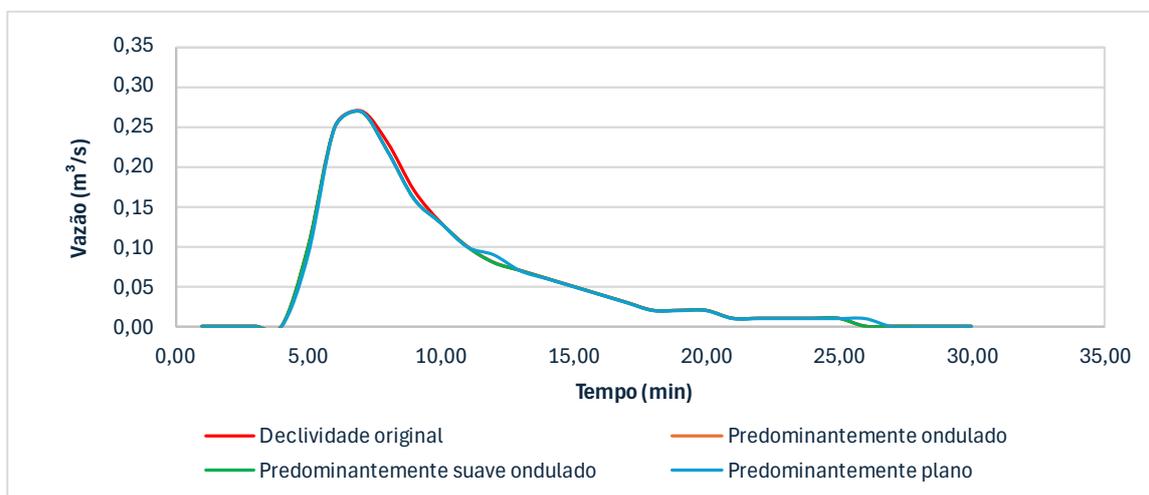
O cenário 1 apresenta a condição do parâmetro CN igual a 80, com aproximadamente 5,20% das áreas das sub-bacias urbanizadas como impermeáveis. A Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam os hidrogramas das vazões afluentes ao exutório, com as variações de declividade, para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Figura 5.7 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 5 anos



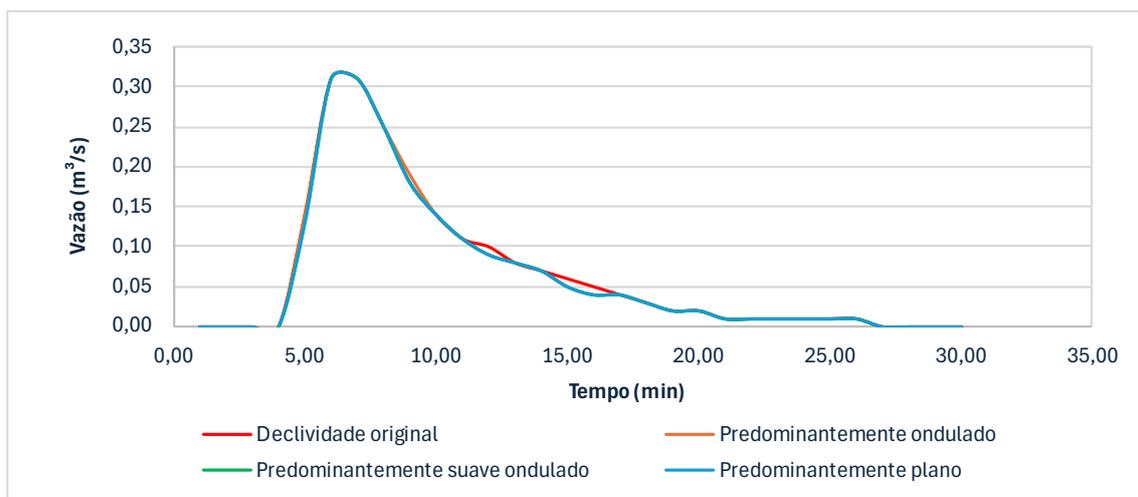
Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.8 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.9 – Hidrograma da vazão afluente no exutório no cenário 1 para Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

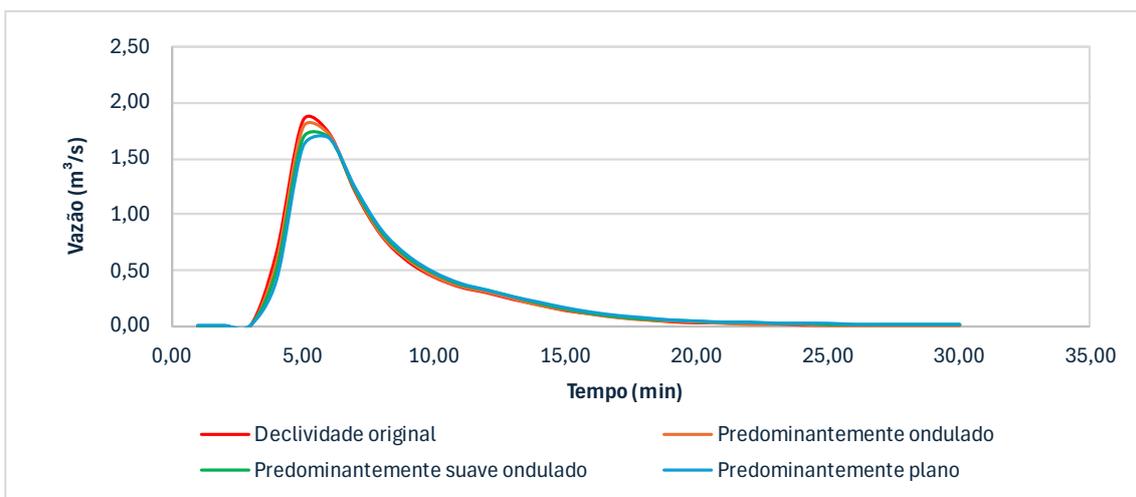
Pode-se notar que para todos os Tempos de Retorno avaliados, a vazão de pico foi a mesma para qualquer intervalo de declividade, o que justifica a sobreposição das curvas dos hidrogramas. Entretanto, identifica-se o aumento da vazão de pico gerado pela mudança do Tempo de Retorno avaliado.

Assim, é evidente que a declividade para o presente cenário não apresenta sensibilidade na geração da vazão no exutório.

5.5.3. Cenário 2

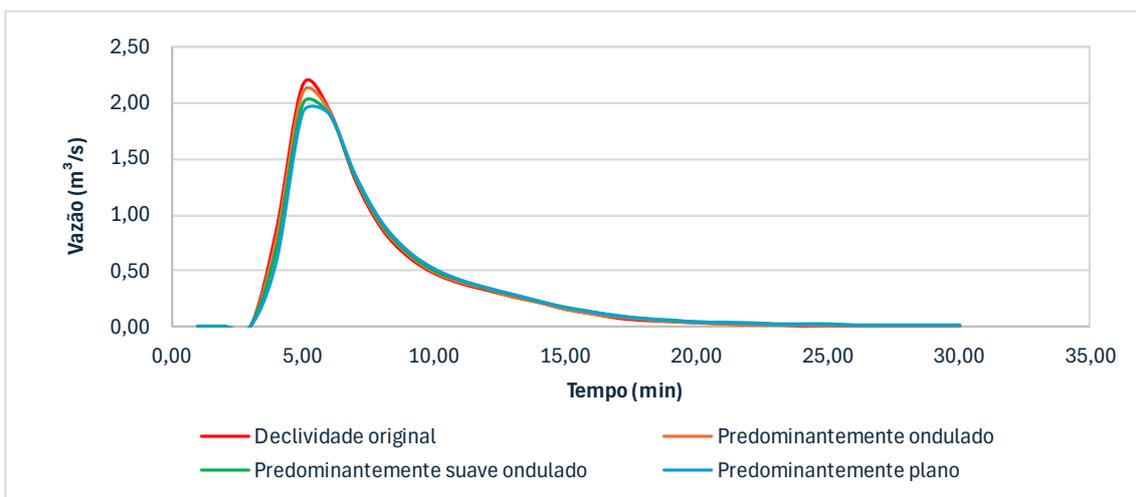
O cenário 2 apresenta a condição do parâmetro CN igual a 85, com aproximadamente 31,60% das áreas das sub-bacias urbanizadas como impermeáveis. A Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam os hidrogramas das vazões afluentes ao exutório, com as variações de declividade, para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Figura 5.10 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 5 anos



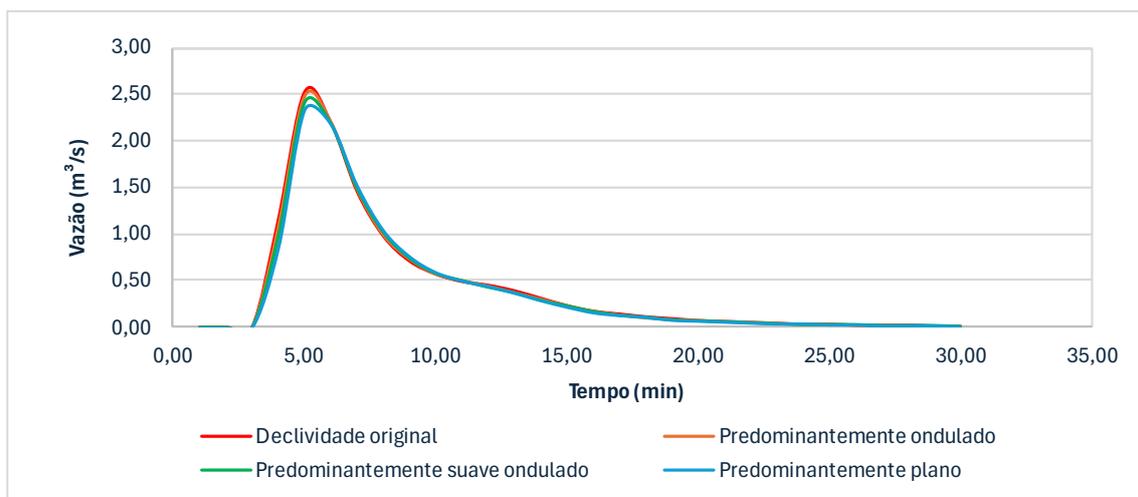
Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.11 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.12 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 2 para Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

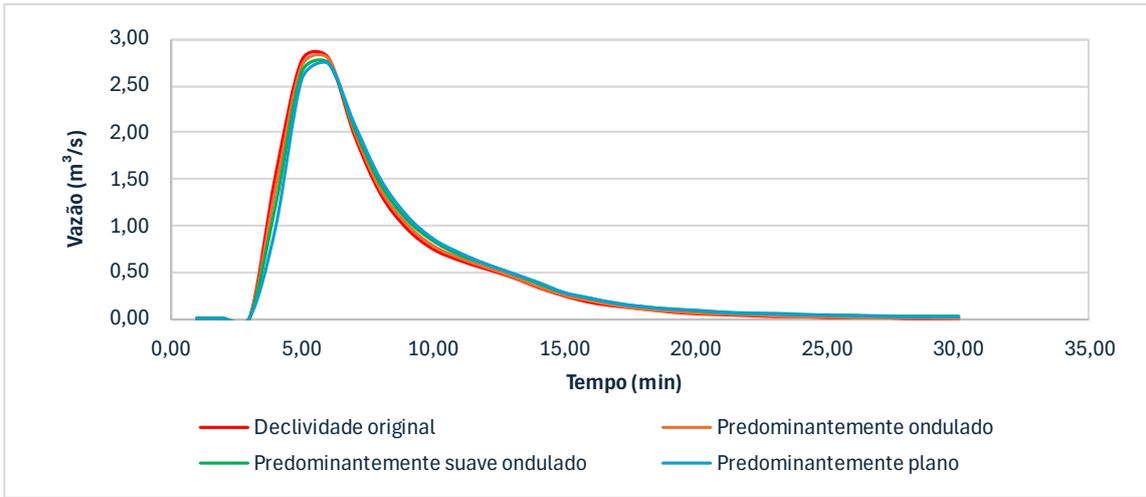
Diferente do cenário 1, para o cenário 2 a vazão no exutório mostrou-se mais sensível quanto a variação da declividade média das sub-bacias urbanizadas. Para o Tempo de Retorno de 5 anos, pode-se notar a redução de 8,15% na vazão ao comparar a declividade original com a situação do relevo predominantemente plano. Para o Tempo de Retorno de 10 anos, essa redução foi de 11,11%, enquanto para 25 anos a vazão reduziu em 7,90%.

Ao comparar a sensibilidade do parâmetro CN, pode-se notar que para todas as simulações houve um aumento significativo da vazão no exutório com o aumento de 80 para 85.

5.5.4. Cenário 3

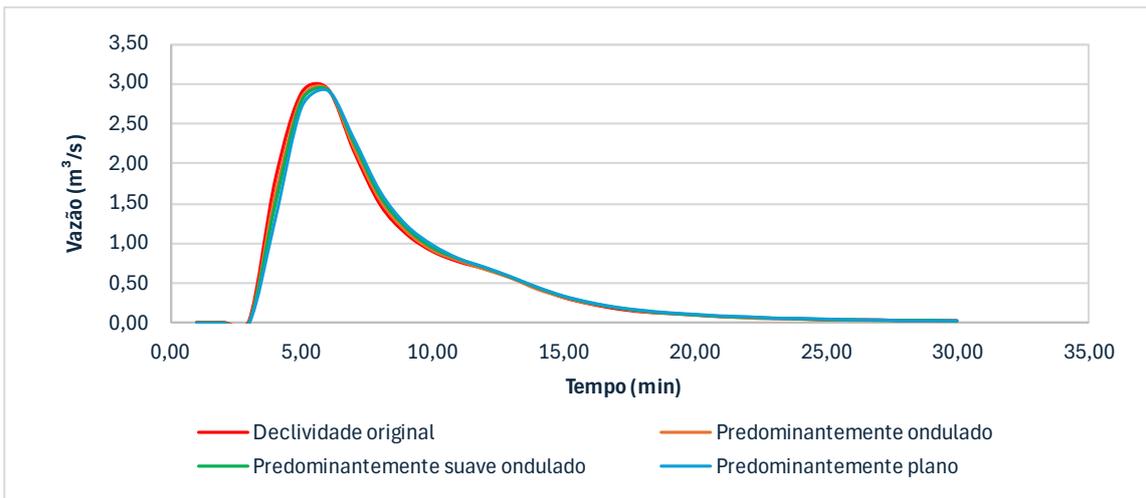
O cenário 3 apresenta a condição do parâmetro CN igual a 90, com aproximadamente 57,90% das áreas das sub-bacias urbanizadas como impermeáveis. A Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam os hidrogramas das vazões afluentes ao exutório, com as variações de declividade, para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Figura 5.13 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 5 anos



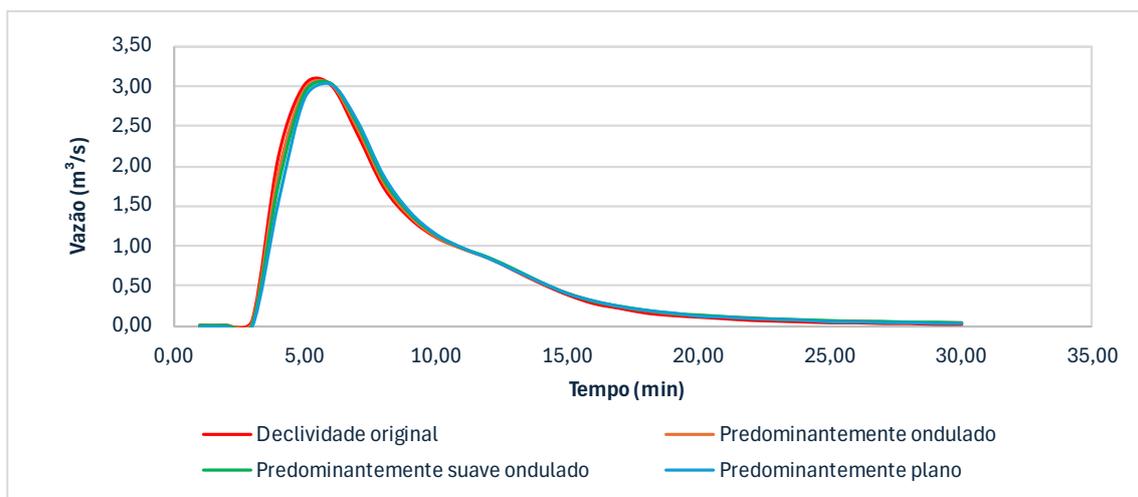
Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.14 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.15 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 3 para Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

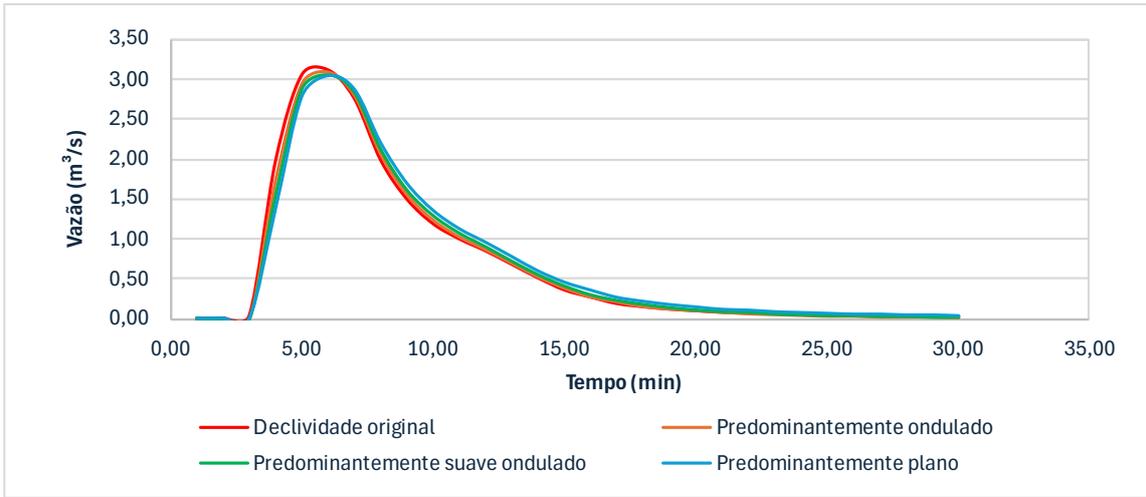
Para o cenário 3, a declividade mostrou-se mais sensível para o Tempo de Retorno de 5 anos com a redução de 1,78% da vazão encontrada no exutório quando comparada a declividade original com a situação de relevo predominantemente plano. Para os Tempos de Retorno de 10 e 25 anos a redução da vazão no exutório decorrente da alteração do relevo foi inferior a 1%.

Nesse cenário, foi possível observar a influência da declividade no retardamento da chegada da vazão de pico no exutório. Ao comparar o hidrogramas referente a declividade original com a situação de predominantemente plano, houve um atraso de 1 minuto nos picos dos hidrogramas para todas as recorrências analisadas.

5.5.5. Cenário 4

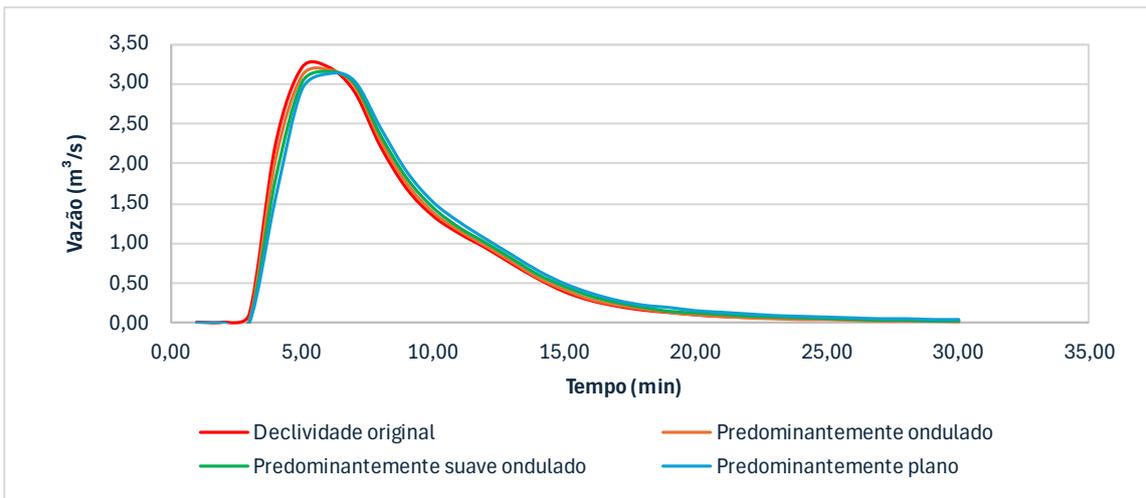
O cenário 4 apresenta a condição do parâmetro CN igual a 95, com aproximadamente 84,20% das áreas das sub-bacias urbanizadas como impermeáveis. A Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam os hidrogramas das vazões afluentes ao exutório, com as variações de declividade, para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Figura 5.16 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 5 anos



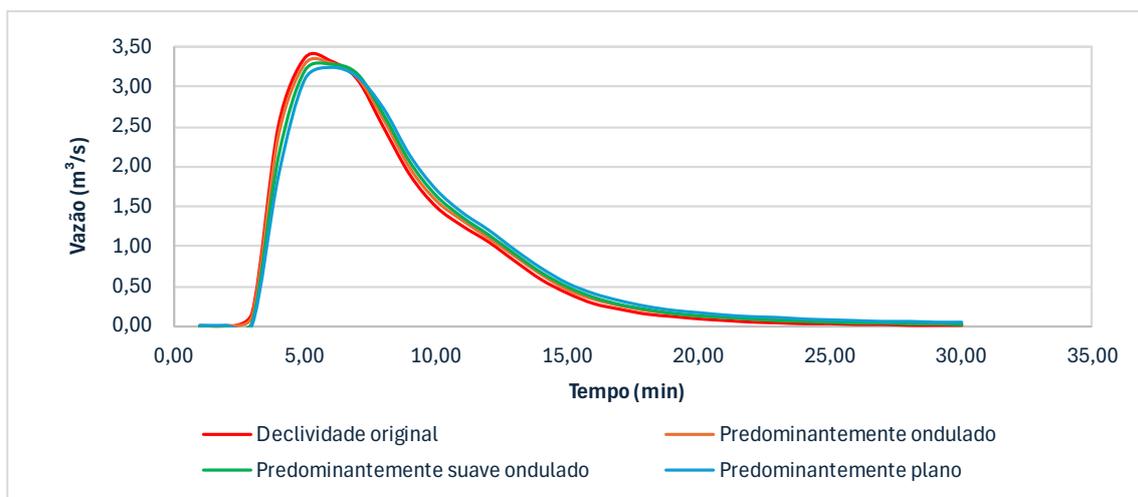
Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.17 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 5.18 – Hidrograma da vazão afluyente no exutório no cenário 4 para Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para o cenário 4, a declividade mostrou-se mais sensível para o Tempo de Retorno de 25 anos ao resultar em uma redução de 3,27% na vazão no exutório quando comparada a declividade original com a situação de predominantemente plano. Além disso, assim como no cenário 3, o aumento do parâmetro CN resultou no atraso de 1 minuto para a chegada da vazão de pico no exutório do loteamento.

5.6. Vazão de lote unitária

A partir das vazões encontradas em cada cenário, foi possível determinar as vazões a serem retidas por área de lote. A Tabela 5.12, Tabela 5.13 e Tabela 5.14 apresentam as vazões a serem retidas por área de lote para cada cenário avaliado e Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Tabela 5.12 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 5 anos

CENÁRIO 0			
Vazão no exutório (m³/s)			0,09
CENÁRIO 1			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	0,24	0,15	0,015
Predominantemente ondulado	0,24	0,15	0,015
Predominantemente suave ondulado	0,24	0,15	0,015
Predominantemente plano	0,24	0,15	0,015
CENÁRIO 2			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	1,84	1,75	0,178

Predominantemente ondulado	1,78	1,69	0,172
Predominantemente suave ondulado	1,69	1,60	0,163
Predominantemente plano	1,69	1,60	0,163
CENÁRIO 3			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	2,80	2,71	0,276
Predominantemente ondulado	2,80	2,71	0,276
Predominantemente suave ondulado	2,75	2,66	0,271
Predominantemente plano	2,75	2,66	0,271
CENÁRIO 4			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	3,11	3,02	0,308
Predominantemente ondulado	3,09	3,00	0,306
Predominantemente suave ondulado	3,06	2,97	0,303
Predominantemente plano	3,04	2,95	0,301

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 5.13 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 10 anos

CENÁRIO 0			
Vazão no exutório (m³/s)		0,15	
CENÁRIO 1			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	0,27	0,12	0,012
Predominantemente ondulado	0,27	0,12	0,012
Predominantemente suave ondulado	0,27	0,12	0,012
Predominantemente plano	0,27	0,12	0,012
CENÁRIO 2			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	2,16	2,01	0,205
Predominantemente ondulado	2,09	1,94	0,198
Predominantemente suave ondulado	2,00	1,85	0,189
Predominantemente plano	1,92	1,77	0,180
CENÁRIO 3			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	2,94	2,79	0,284
Predominantemente ondulado	2,94	2,79	0,284
Predominantemente suave ondulado	2,92	2,77	0,282
Predominantemente plano	2,92	2,77	0,282
CENÁRIO 4			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	3,20	3,05	0,311
Predominantemente ondulado	3,18	3,03	0,309
Predominantemente suave ondulado	3,16	3,01	0,307

Predominantemente plano	3,12	2,97	0,303
-------------------------	------	------	-------

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 5.14 – Vazões retidas por área de lote para Tempo de Retorno de 25 anos

CENÁRIO 0			
Vazão no exutório (m ³ /s)		0,24	
CENÁRIO 1			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	0,31	0,07	0,007
Predominantemente ondulado	0,31	0,07	0,007
Predominantemente suave ondulado	0,31	0,07	0,007
Predominantemente plano	0,31	0,07	0,007
CENÁRIO 2			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	2,53	2,29	0,233
Predominantemente ondulado	2,48	2,24	0,228
Predominantemente suave ondulado	2,41	2,17	0,221
Predominantemente plano	2,33	2,09	0,213
CENÁRIO 3			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	3,03	2,79	0,284
Predominantemente ondulado	3,03	2,79	0,284
Predominantemente suave ondulado	3,02	2,78	0,283
Predominantemente plano	3,02	2,78	0,283
CENÁRIO 4			
DECLIVIDADE	VAZÃO NO EXUTÓRIO (m³/s)	VAZÃO EXCEDENTE (m³/s)	VAZÃO RETIDA POR ÁREA DE LOTE (m³/s)
Original	3,36	3,12	0,318
Predominantemente ondulado	3,30	3,06	0,312
Predominantemente suave ondulado	3,28	3,04	0,310
Predominantemente plano	3,25	3,01	0,307

Fonte: Elaboração própria (2025)

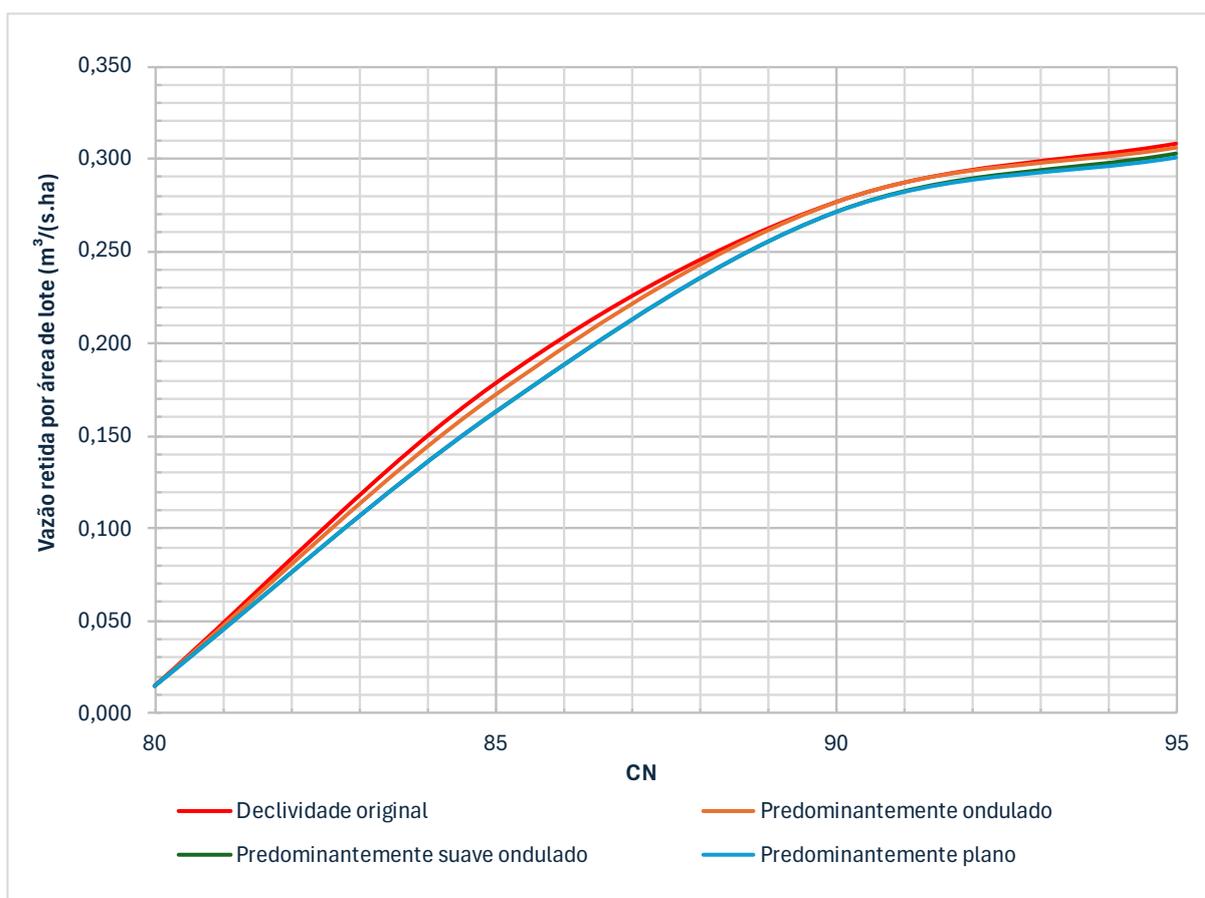
Nota-se que para todos os Tempos de Retorno avaliados a vazão gerada no exutório para o cenário 1, referente ao parâmetro CN igual a 80, se manteve constante para todos os intervalos de declividade. Entretanto, considerado o cenário 2, houve redução na vazão do exutório para todos os Tempos de Retorno, principalmente para a recorrência de 10 anos, em que a vazão no exutório reduziu em 11,11% com a mudança do relevo original para predominantemente plano.

Com relação ao cenário 3, a maior redução da vazão no exutório ao variar a declividade das sub-bacias urbanizadas foi para o Tempo de Retorno de 5 anos, o qual apresentou redução de 1,78% ao comparar a declividade original com o relevo predominantemente plano. No

cenário 4, a redução foi maior, equivalente a 3,27% menor quando comparado a declividade original e predominantemente plano para Tempo de Retorno de 25 anos.

A partir disso, foi possível traçar os ábacos que relacionam a declividade, as vazões a serem retidas e o parâmetro CN para cada cenário avaliado. A Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21 apresentam os ábacos para os Tempo de Retorno de 5, 10 e 25 anos, respectivamente.

Figura 5.19 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 5 anos

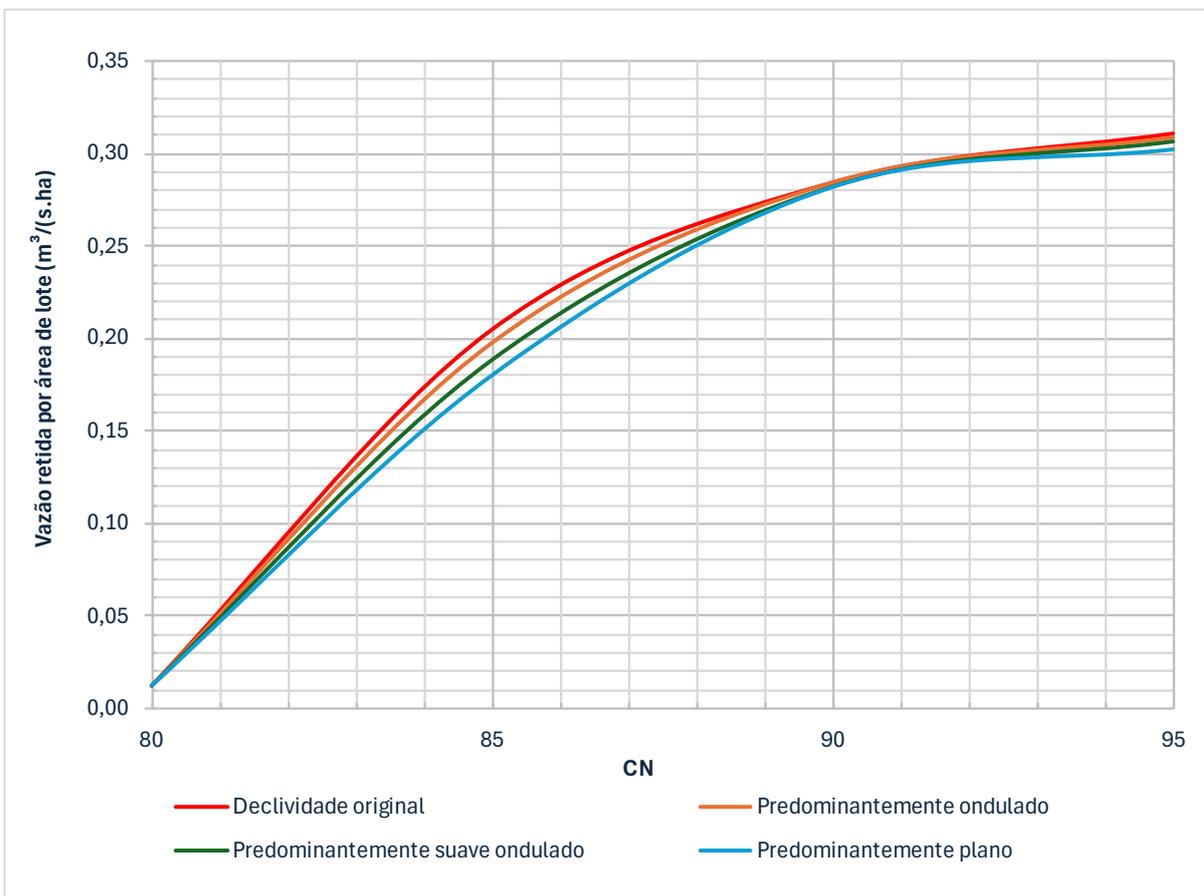


Fonte: Elaboração própria (2025)

Pela figura anterior, pode-se observar que as curvas que representam a situação do relevo predominantemente plano e suave ondulado estão sobrepostas, visto que a declividade não se mostrou sensível na geração de vazão no exutório para essa variação de relevo independentemente do parâmetro CN avaliado. Situação semelhante ocorre quando comparadas a declividade original com o relevo predominantemente ondulado para o CN 95, ao observar pelo ábaco o mesmo valor de vazão a ser retida por área de lote para ambos os intervalos de declividade. Além disso, nota-se um comportamento semelhante entre as curvas a partir do

valor de CN próximo de 89, as quais a partir do valor 94 começam a apresentar encaminhamentos diferentes.

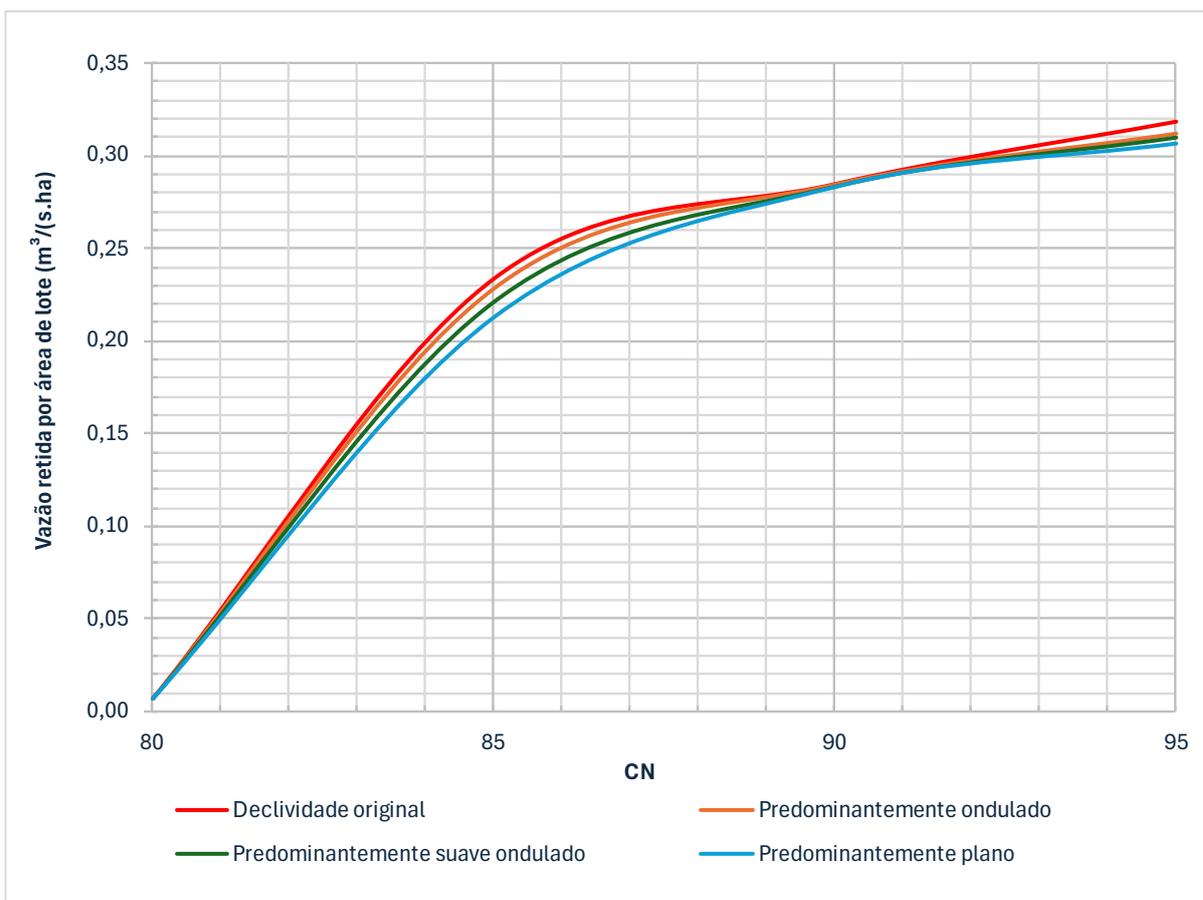
Figura 5.20 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Diferente do ábaco para Tempo de Retorno de 5 anos, para a recorrência de 25 anos as curvas tendem a convergir para um único valor de vazão a ser retida por área de lote para o valor do parâmetro CN igual a 90. Isso após ser evidenciada a grande sensibilidade da vazão a ser retida por área de lote para o CN igual a 85.

Figura 5.21 – Ábaco de relação entre vazão retida por lote, declividade e CN para Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para o Tempo de Retorno de 25 anos pode-se notar a sensibilidade da declividade para o parâmetro CN igual a 85, enquanto para o CN 90 as curvas passam a convergir para um único ponto e tornam a ficar distantes entre si para o CN 95.

Por se tratar de uma simulação no *software* SWMM, um modelo especializado para análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais e residuárias urbanas, é factível que o modelo apresente resultados mais sensíveis para parâmetros associados a condição urbanizada de uso e ocupação do solo. Assim, a maior diferença para os valores de vazões retidas por área de lote encontradas para o cenário 2 está dentro do esperado, visto que, conforme Rolim (2004), pode-se considerar o parâmetro CN de 85 para áreas urbanizadas e com lotes de até 500m².

A partir das vazões encontradas, essas podem servir como subsídio para a elaboração de diretrizes técnicas públicas para prefeituras municipais, capazes de regulamentar o lançamento de águas pluviais nos cursos d'água naturais e balizar o planejamento urbano, a gestão dos recursos hídricos e prevenção de desastres. Assim, a integração de dados

hidrológicos confiáveis à formulação de políticas públicas constitui um pilar para o desenvolvimento de cidades mais resilientes, seguras e ambientalmente sustentáveis.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a sensibilidade da declividade e da urbanização, representada pelo parâmetro CN, na geração final do escoamento superficial em um loteamento no município de Itajubá/MG, de modo a sugerir uma vazão a ser retida por área de lote como medida de gestão de águas pluviais urbanas. Para isso, foi realizada a caracterização da área de estudo, bem como da infraestrutura de drenagem do município de Itajubá, para se obter os parâmetros necessários a serem inseridos na modelagem hidrológica no *software* SWMM.

No cenário 0, considerada a condição de pré-urbanização, foi possível notar a influência do Tempo de Retorno na geração do escoamento superficial, ao resultar em um aumento de 167% na vazão no exutório da área de drenagem quando comparado as recorrências de 5 e 25 anos. O parâmetro CN mostrou-se consideravelmente sensível na geração do escoamento superficial para todas as recorrências de chuva e condições de relevo analisadas. A maior diferença das vazões encontradas foi para o Tempo de Retorno de 25 anos e declividade original, ao apresentar um aumento de 3,05m³/s quando comparada as vazões para os valores de CN 80 e 95.

Além disso, foi possível concluir que a declividade possui menor sensibilidade no escoamento superficial quando comparado ao parâmetro CN para os cenários avaliados no SWMM. Entretanto, quando avaliado em conjunto a relação da declividade e do parâmetro CN, notou-se que a declividade se mostra mais sensível para o parâmetro CN de 85, caracterizado por 31,60% da área das sub-bacias impermeabilizadas. Para esse cenário, as reduções nas vazões decorrentes da alteração do relevo original para predominantemente plano foram de 8,15%, 11,11% e 7,90% para os Tempos de Retorno de 5, 10 e 25 anos respectivamente.

A vazão a ser retida por área de lote foi definida e registrada em ábacos que relacionam a referida vazão, o parâmetro CN e a declividade do terreno da sub-bacia para diferentes Tempos de Retorno avaliados. Os ábacos mostraram-se condizentes com as vazões encontradas para cada cenário e podem servir como ferramenta de gestão de águas pluviais para o município.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se replicar o modelo para diferentes áreas do município de Itajubá e verificar a possibilidade de desenvolver um ábaco único de Vazão retida x Declividade x CN para o município de Itajubá, o qual pode servir de referência para a elaboração de legislações específicas para controle de enchentes. Com relação a modelagem hidrológica, sugere-se replicar o modelo desenvolvido com diferentes métodos de infiltração e

de propagação de fluxo, de modo a avaliar a sensibilidade na geração do escoamento superficial da área avaliada.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Guarabira, v. 3, n. 1, p. 166-188, nov. 2009.

ALVES, R. A. *et. al.* Abordagens baseada na natureza para gestão sustentável de águas pluviais em ambientes urbanos: uma análise bibliométrica. **Dossiê Metodologias Qualitativas de Pesquisa e/ou Ação**, v. 9, 2023.

ANA. **Portal Hidroweb**. 2024. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acesso: 02/01/2024.

BABAEI, S. GHAZAVI, R. ERFANIAN, M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. Elsevier, v. 5, p. 3-11, 2018.

BAPTISTA, M. CARDOSO, A. **Rios e Cidades: um longa e sinuosa história**. Revista UFMG, v. 20, n. 2, p. 124-153, 2013.

BARROS, A. M.; NEVES, M. G. F. P.; HENRIQUE, D. C. Variabilidade e Causa na Geração de Vazão em Bacias Urbanas: Estudo de Caso do Riacho do Sapo, Maceió-AL. **Revista Eletrônica de Gestão de Tecnologias Ambientais – GESTA**, v. 4, n. 2, p. 220-231, 2016.

BASSO, R. E.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R.; PICKBRENNER, K. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635-641, 2016.

BELO HORIZONTE. **Lei de uso e ocupação do solo: estudos básicos**. Plano diretor de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 1995.

BRASIL. Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Brasília, DF: Assembleia Legislativa, 2020.

BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Brasília, DF: Assembleia Legislativa, 1997.

BRASIL. Atualização dos critérios e indicadores para a identificação dos municípios mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, enxurradas e inundações para serem priorizados nas ações da União em gestão de risco e de desastres naturais. **Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR**. Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento. 2023.

BRASIL. Prefeitura Municipal de Maxaranguape. **Desenvolvimento com responsabilidade**. 2021. Disponível em: <https://site.maxaranguape.rn.gov.br/>. Acesso em: 07 dez. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas: portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, v. 2, 2016.

BRITO, H. C. *et. al.* Desenvolvimento de baixo impacto no manejo de águas pluviais urbanas: Uma Revisão Bibliométrica. **Anais do XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas**. 2022.
CAMPANA, N. A. BERNARDES, R. S. SILVA JR., J. A. Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, n. 3, 2007.

CAMPOS, J. N. B. CAMPOS, V. R. A formação dos conhecimentos em recursos hídricos e aplicações em tomadas de decisões. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 179-194, 2015.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CAVALCANTI, A. B. Utilização do software SWMM na modelagem hidrológica da sub-bacia do Ribeirão Vai e Volta – Poços de Caldas/MG. **Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental)**, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2020.

COLLODEL, M. G. Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na Avaliação de Diferentes Níveis de Detalhamento da Bacia Hidrográfica Submetida ao Processo de Transformação Chuva x Vazão. **Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)**, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SP), 2009.

CONFORTO, E. C. *et al.* Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGDP**, Porto Alegre, 2011.

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

DGAU, Diretoria de Gestão de Águas Urbanas. Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem. Cap. 3, Controle na Fonte e Lançamento no Sistema Público de Drenagem. **Prefeitura Municipal de Belo Horizonte**, Belo Horizonte, 2022.

DISTRITO FEDERAL. Resolução Nº 9, de 08 de abril de 2011. **Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e Estados**. Distrito Federal, DF: ADASA (Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, 2011.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, p.93, 1979.

FADIGAS, E. A. F. A. Energia Eólica. In: Moreira, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro, LTC - GEN – Grupo editorial nacional, p. 160-186, 2017.

GOMES, M. S. S. PAIVA, J. M. F. MORIS, V. A. S. NUNES, A. O. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. **Energy**, v. 185, p. 327-336, 2019.

GONTIJO, N. T. Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica. **Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Report**, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Nota Técnica: Riscos Geo-Hidrológicos para o Rio Grande do Sul, para o período entre 10 a 13/05/2024. **Nota Técnica**, maio 2024.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Câmeras Imageadores CBERS 04A**. 2019. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers04a.php>. Acesso em: 20 dez. 2023.

ITAJUBÁ. Lei Nº 3352, de 17 de dezembro de 2019. **Aprova o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Itajubá e dá outras providências**. Itajubá, MG, 2019.

JAHU. Lei Complementar Nº 559, de 10 de março de 2020. **Altera a Lei Complementar Nº 277, de 10 de outubro de 2006, que estabelece o Plano Diretor de Jahu, e a Lei Complementar Nº 443, de 14 de novembro de 2012, que dispõe sobre o zoneamento, o parcelamento, o uso e a ocupação do solo**. Jahu, SP, 2020.

JUNIOR, J. M. S. *et. al.* Modelagem de Sistema de Drenagem com Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID). **Caderno de Arquitetura e Urbanismo. Edição Temática Água e Mudanças Climáticas**. n. 34, 2023.

MAIA, J. S. M. Água e civilizações: história ambiental, desafios contemporâneos e perspectivas diplomáticas. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v.17, n. 22, p. 710-725, 2024.

MARCIANO, A. G. Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG. **Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica)** – Universidade Federal de Itajubá, 2019.

MENDONÇA, I. M. Prospects for wind power generation in Brazil. **Brazil Journal of Development**. Curitiba, v. 5, n. 10, p. 18598-18611, out. 2019.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Secretária de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (org.). **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa, 2010.

MOURA, N. C. B. PELLEGRINO, P. R. M. MARTINS, J. R. S. Best management practices as an alternative for flood and urban storm water control in a changing climate. **Journal of Flood Risk Management**, v. 9, p. 243-254, 216.

NRCS - *NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology. Chapter 10 – Estimations of Direct Runoff from Storm Rainfall. United States Department of Agriculture, 2004.*

PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Editora LTC, Rio de Janeiro, p. 392, 2013.

ONU (2022). For a Better Urban Future World Cities Report 2022. First published 2022 by **United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)** Copyright United Nations Human Settlements Programme, 2022. HS Number: HS/004/22E. ISBN Number (Series): 978-92-1-133395-4. ISBN Number: 978-92-1-132894-3.

POMPÊO, C. A. Drenagem Urbana Sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n.1, p. 15-23, 2000.

PORTO ALEGRE. Decreto Nº 18.611, de 9 de abril de 2014. **Regulamenta o controle da drenagem urbana e revoga os itens 4.8.6, 4.8.7 e 4.8.9 do Decreto Nº 14.786, de 30 de dezembro de 2004 - Caderno de Encargos do DEP - e o Decreto Nº 15.371, de 17 de novembro de 2006**. Porto Alegre, RS, 2014.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIO DE JANEIRO. Decreto Nº 23.940, de 30 de janeiro de 2004. **Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

RIO DE JANEIRO. Lei Nº 9.164, de 28 de dezembro de 2020. **Regulamenta os procedimentos para armazenamento e retardo de água de chuva em perímetros urbanos para aproveitamento e postergação de sua descarga na rede pública, além da acumulação de água cinza clara para seu tratamento e uso em fins cuja água não necessite ter caráter potável consoante as normas técnicas e dá outras providências e revoga a Lei Nº 7.463, de 18 de outubro de 2016**. Rio de Janeiro, RJ: Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, 2020.

RODRIGUES, G. C.; SANTINI JR, M. A. Avaliação do Emprego de Técnicas Compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do Município de Fernandópolis, São Paulo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 26, n. 2, p. 231-237, 2021.

ROLIM, Adriano. **Apostila Hidrologia Aplicada**. Porto Alegre: Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2004.

RUCKERT, A. A. et. al. A tragédia climática no Rio Grande do Sul em 2024. Anotações sobre uma catástrofe anunciada. **Revista Geografares**, v. 39, 2024.

SÃO PAULO. Lei Nº 13.276, de 05 de janeiro de 2002. **Torna obrigatória a execução de reservatório para as águas coletadas por coberturas e pavimentos nos lotes, edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 500m²**. São Paulo, SP, 2002.

SÃO PAULO. Lei Nº 12.526, de 02 de janeiro de 2007. **Estabelece normas para a contenção de enchentes e destinação de águas pluviais**. São Paulo, SP: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2007.

SANTOS, P. M. D. Procedimento para prospecção de potencial eólico com auxílio de sistemas de informação geográfica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)**, Universidade Federal de Itajubá (MG), p. 119, 2015.

SARTORI, A. Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. **Tese (Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo)** – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SILVA, D. F. *et. al.* Drenagem e manejo de águas pluviais no Brasil: conceitos, gestão e estudos de caso. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 21, e. 1, p. 1- 18, 2024.

SILVA, L. A. *et. al.* Gestão da Drenagem Urbana: O software SWMM e a educação ambiental como auxiliares na aplicação de técnicas LIDs. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paraná, v. 7, n. 3, p. 439-1, 439-21, 2022.

SILVA, R. F. *et. al.* Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 47, 2016.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5- 23, 2005.

SMDU. SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais. **Plano Municipal de Gestão do Sistema de Águas Pluviais de São Paulo**, São Paulo, v. 1, 2012.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Ministérios das Cidades**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Brasília. 2022.

SOTTO, D. *et. al.* Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implantação. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 97, p. 61-80, 2019.

SOTTO, D. PHILIPPI JR. A. Gestão da drenagem urbana em Planos Diretores de cidades brasileiras. **Construindo sustentabilidade em contextos urbanos**. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública, USP, 2022.

SOUZA, C. F. CRUZ, M. A. S. TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SOUZA, W. B. *et. al.* Um estudo Bibliométrico e Sistemático sobre o Planejamento de Sistemas de Drenagem Urbana. **Revista Boletim do Gerenciamento**, n. 9, p. 1-10, jun 2019.

SOUZA, T. C. T. Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos HEC-HMS e SWMM – Estudo de caso para o núcleo urbano e região periurbana de Muniz Freire. **Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável)** – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

TOLMASQUIM, M. T. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: 2016.

TORRICO, J. J. T. **Práticas hidrológicas**, p. 120, Rio de Janeiro, 1974.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudo Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, C. E. M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas. **Ministérios das Cidades**. Unesco, 194 p, 2005.

U.S. EPA. *Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model – User’s manual USEPA/600/R-05/040 – July 2010. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, U.S Environmental Protection Agency Cincinnati, OH 45268, U.S.A.* **Versão Brasileira do Manual e Programa do SWMM 5.0 – Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa: 2012.

VALENÇA, A. K. A. Metodologias Ativas No Ensino De Engenharia: Uma Revisão Bibliométrica. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, Florianópolis, v. 23, n. 2, p. 1-26, set. 2023.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil. 1975.

WMO. **Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019)**. Geneva, Switzerland, 2021.

APÊNDICE A – CHUVAS MÁXIMAS E FALHAS PLUVIOMÉTRICAS

Nesse apêndice são apresentadas as chuvas máximas diárias para cada ano hidrológico e as falhas pluviométricas, com base na série histórica da estação São João de Itajubá (2245083).

FALHAS DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS – ESTAÇÃO SÃO JOÃO DE ITAJUBÁ (2245083)				
Ano	Início	Fim	Máxima (mm)	Falhas
1966	1/10/1966	30/09/1967	63,00	Existem 15 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
1967	1/10/1967	30/09/1968	40,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1968	1/10/1968	30/09/1969	78,20	Não existem falhas ao longo deste ano
1969	1/10/1969	30/09/1970	52,40	Não existem falhas ao longo deste ano
1970	1/10/1970	30/09/1971	105,20	Existem 31 dias com falha no período chuvoso e 6 dias de falha no período seco
1971	1/10/1971	30/09/1972	62,40	Existem 37 dias com falha no período seco
1972	1/10/1972	30/09/1973	45,20	Existem 92 dias com falha no período chuvoso e 107 dias de falha no período seco
1973	1/10/1973	30/09/1974	96,00	Existem 19 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
1974	1/10/1974	30/09/1975	66,20	Não existem falhas ao longo deste ano
1975	1/10/1975	30/09/1976	78,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1976	1/10/1976	30/09/1977	72,40	Não existem falhas ao longo deste ano
1977	1/10/1977	30/09/1978	80,40	Não existem falhas ao longo deste ano
1978	1/10/1978	30/09/1979	93,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1979	1/10/1979	30/09/1980	92,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1980	1/10/1980	30/09/1981	49,00	Existem 136 dias com falha no período chuvoso e 23 dias de falha no período seco
1981	1/10/1981	30/09/1982	70,00	Existem 31 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
1982	1/10/1982	30/09/1983	67,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1983	1/10/1983	30/09/1984	66,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1984	1/10/1984	30/09/1985	72,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1985	1/10/1985	30/09/1986	49,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1986	1/10/1986	30/09/1987	72,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1987	1/10/1987	30/09/1988	57,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1988	1/10/1988	30/09/1989	78,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1989	1/10/1989	30/09/1990	58,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1990	1/10/1990	30/09/1991	100,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1991	1/10/1991	30/09/1992	96,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1992	1/10/1992	30/09/1993	118,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1993	1/10/1993	30/09/1994	73,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1994	1/10/1994	30/09/1995	64,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1995	1/10/1995	30/09/1996	80,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1996	1/10/1996	30/09/1997	54,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1997	1/10/1997	30/09/1998	55,00	Não existem falhas ao longo deste ano
1998	1/10/1998	30/09/1999	81,10	Existem 1 dia com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
1999	1/10/1999	30/09/2000	48,40	Não existem falhas ao longo deste ano
2000	1/10/2000	30/09/2001	84,00	Não existem falhas ao longo deste ano
2001	1/10/2001	30/09/2002	62,20	Não existem falhas ao longo deste ano
2002	1/10/2002	30/09/2003	46,10	Existem 31 dias com falha no período seco
2003	1/10/2003	30/09/2004	49,80	Existem 28 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco

FALHAS DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS – ESTAÇÃO SÃO JOÃO DE ITAJUBÁ (2245083)				
Ano	Início	Fim	Máxima (mm)	Falhas
2004	1/10/2004	30/09/2005	68,20	Não existem falhas ao longo deste ano
2005	1/10/2005	30/09/2006	58,50	Não existem falhas ao longo deste ano
2006	1/10/2006	30/09/2007	63,30	Existem 30 dias com falha no período seco
2007	1/10/2007	30/09/2008	87,40	Não existem falhas ao longo deste ano
2008	1/10/2008	30/09/2009	64,40	Existem 31 dias com falha no período chuvoso e 92 dias de falha no período seco
2009	1/10/2009	30/09/2010	74,10	Não existem falhas ao longo deste ano
2010	1/10/2010	30/09/2011	76,30	Existem 30 dias com falha no período seco
2011	1/10/2011	30/09/2012	141,30	Não existem falhas ao longo deste ano
2012	1/10/2012	30/09/2013	73,90	Não existem falhas ao longo deste ano
2013	1/10/2013	30/09/2014	42,60	Existem 122 dias com falha no período seco
2014	1/10/2014	30/09/2015	51,60	Não existem falhas ao longo deste ano
2015	1/10/2015	30/09/2016	66,00	Existem 61 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
2016	1/10/2016	30/09/2017	74,60	Não existem falhas ao longo deste ano
2017	1/10/2017	30/09/2018	37,20	Não existem falhas ao longo deste ano
2018	1/10/2018	30/09/2019	49,80	Existem 121 dias com falha no período chuvoso e 183 dias de falha no período seco
2019	1/10/2019	30/09/2020	69,00	Existem 61 dias com falha no período chuvoso e 0 dias de falha no período seco
2020	1/10/2020	30/09/2021	82,30	Existem 122 dias com falha no período chuvoso e 183 dias de falha no período seco
2021	1/10/2021	30/09/2022	57,80	Existem 31 dias com falha no período seco
2022	1/10/2022	30/09/2023	58,30	Não existem falhas ao longo deste ano
2023	1/10/2023	30/09/2024	00,00	Existem 92 dias com falha no período chuvoso e 122 dias de falha no período seco
2024	1/10/2024	30/09/2025	00,00	Existem 183 dias com falha no período chuvoso e 183 dias de falha no período seco

