



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – DECA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

EMANUEL GOMES SOARES

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE CHEIAS NA REGIÃO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ: ANÁLISE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL COM O USO DE TRÊS CENÁRIOS E PRÉ-DIMENSIONAMENTO
DE UMA BACIA DE DETENÇÃO**

João Pessoa - PB

Outubro de 2024

EMANUEL GOMES SOARES

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE CHEIAS NA REGIÃO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ: ANÁLISE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL COM O USO DE TRÊS CENÁRIOS E PRÉ-DIMENSIONAMENTO
DE UMA BACIA DE DETENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Paraíba como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel, em
engenharia ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos
e Meio ambiente.

Orientador: Prof. Gustavo Barbosa Lima da
Silva.

João Pessoa - PB

Outubro de 2024

FOLHA FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

S676a Soares, Emanuel Gomes.

Avaliação dos impactos da urbanização sobre cheias na região da bacia hidrográfica do Rio Cuiá: análise do escoamento superficial com o uso de três cenários e pré-dimensionamento de uma bacia de detenção / Emanuel Gomes Soares. - João Pessoa, 2024.

130 f.

Orientação: Gustavo Barbosa Lima da Silva.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Urbanização. 2. Cheias. 3. Modelagem Hidrológica. 4. Bacia de Detenção. 5. ABC 6. I. Silva, Gustavo Barbosa Lima da. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

EMANUEL GOMES SOARES

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE CHEIAS NA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ: ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL COM O USO DE TRÊS CENÁRIOS E PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UMA BACIA DE DETENÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 25/10/2024 perante a seguinte
Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima da Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
do CT / UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)

Prof.^a Dr.^a Ana Cristina Souza da Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
do CT / UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)

Prof. Dr. Hamilcar José Almeida Filgueira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
do CT / UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)

Prof.^a Dr.^a Aline Flavia Nunes Remigio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que sempre foram peças fundamentais no decorrer deste processo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** por toda a sabedoria e ajuda para reverter situações que muitas vezes pareciam impossíveis e, principalmente, pela força obtida através dos ensinamentos das reuniões da Prosperidade com Deus, que sempre me motivaram a não desistir e a dar o meu melhor, especialmente nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais, **Edileusa de Matos Gomes** e **Gerilson Soares dos Santos**, e aos meus irmãos, **Lucas Gomes Soares** e **Eduardo Gomes Soares**, pelo apoio durante este ciclo.

Agradeço ao professor **Gustavo Barbosa Lima da Silva**, orientador deste trabalho, e aos professores **Hamilcar José Almeida Filgueira**, com quem aprendi muito sobre hidráulica e gestão de riscos e desastres, e **Ana Cristina Souza da Silva**, pelas oportunidades em projetos de pesquisa, monitoria e extensão na área de recursos hídricos. Todos, membros da banca. Um agradecimento especial ao professor **Cristiano Almeida**, cujos ensinamentos despertaram meu interesse pelo setor de recursos hídricos.

Também agradeço ao professor **Ademar Virgolino da Silva Netto** e à professora **Elisângela Maria Rodrigues Rocha** pelas oportunidades no Projeto Tratamento de Resíduos Eletroeletrônicos (TREE). Sou grato aos amigos **Luana Camila Araújo**, **Ana Beatriz M. Neves**, **Andrews César C. da Silva**, **Brunna Hillary C. de Oliveira**, **Thayná dos S. Amorim** e **Sthefany Correia de Oliveira**, com os quais compartilhei aprendizado ao longo dos quatro anos de Projeto TREE.

Agradeço também a **Manoella Santos Moraes**, que me incentivou a me inscrever na monitoria de Hidrologia e com quem compartilhei muitos momentos no Projeto TREE de 2021 a 2024. Ela foi uma das pessoas mais importantes na construção dessa trajetória e uma das que mais vi crescer dentro desta instituição.

Agradeço especialmente a **Maria Clara Ribeiro Vilaça**, uma das pessoas mais inteligentes e importantes que já conheci. Sou grato pelo apoio e amizade dela, uma das pessoas que mais tiveram consideração por mim ao longo deste percurso, especialmente no final do curso, uma amizade que se iniciou ainda no período 2021.2.

Algumas pessoas não podem ficar de fora deste agradecimento, como **Wellington Marcio Santos de Arruda**, uma das primeiras pessoas que conheci nesta instituição, bem como **Antônio Júnior da Silva Rocha**, ainda no curso de Engenharia de Alimentos, com os quais dediquei muitas horas de estudo nas disciplinas de cálculo e foram pessoas muito importantes na consolidação desse processo.

Agradeço a amigos como **José Carlos Andrade Neto**, **Antônio Edmilson de Alcântara Dantas**, **Isabela Vanessa da Silva**, **Elayne Cristina Barbosa Felix**, **Giovanna dos Santos Silva**, **Izabely Ester** e **Leonardo Maciel de Sousa** amizades fundamentais, que contribuíram para a conclusão dessa etapa.

Agradeço também a **David Santos Nascimento**, futuro engenheiro eletricitista, **Wesley Devison Melo Xavier**, futuro engenheiro civil, e **Matheus Henrique da Silva Lima**, futuro arquiteto, amigos que tive o prazer de compartilhar o deslocamento diário para a universidade e que sempre torceram por mim. E às amigas **Tayane de Siqueira Silva**, **Alaine de S. Pereira**, **Ismerina Celeste**, **Francisca Marta de Sousa Pereira** e **Kaliane dos Santos Lima**, que também foram muito importantes na finalização desta etapa e as quais tive o prazer de conhecer por meio do projeto de monitoria na disciplina hidrologia.

EPÍGRAFE

“A fé e a inteligência trabalham juntas. Embora a fé seja encarada como loucura para este mundo, ela é inteligente porque nos faz saber que temos direito à felicidade. A fé faz com que recusemos uma vida de derrotas e conquistemos uma vida de vitórias. Se tudo não está de acordo com os seus ideais, está na hora de você refletir com a sua inteligência e usar a sua fé para trazer à existência os desejos de seu coração.”

(Aleluia, rede, s.d)

RESUMO

Este estudo avalia os impactos da urbanização sobre as cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, situada no município de João Pessoa - PB, utilizando modelagem hidrológica com o *software* ABC 6. Com base em imagens de satélite do *PlanetScope Scene* e do *LANDSAT 4-5 TM L-1*, foram caracterizados três cenários de ocupação do solo: passado (2007), atual (2024) e futuro. Para cada um dos cenários, hidrogramas de cheia foram simulados, considerando eventos intensos de precipitação. Além disso, quantificou-se a eficiência e os custos de implantação de uma bacia de retenção proposta para controle de cheias na bacia hidrográfica. Os resultados mostram que a urbanização promove aumentos expressivos de volume de escoamento superficial e de vazões máximas, agravando as inundações. A implementação da bacia de retenção mostra-se eficaz na redução dos picos de cheia, contribuindo para a mitigação dos impactos das inundações urbanas. No entanto, a necessidade de um volume de armazenamento extremamente elevado para a bacia de retenção no ponto crítico do estudo revela a inviabilidade dessa solução, indicando que pode não ser a abordagem mais adequada para o caso analisado.

Palavras-chave: Urbanização. Cheias. Modelagem Hidrológica. Bacia de Retenção. ABC 6.

ABSTRACT

This study evaluates the impacts of urbanization on floods in the Cuiá River basin, located in the municipality of João Pessoa - PB, using hydrological modeling with the ABC 6 software. Based on satellite images from PlanetScope Scene and LANDSAT 4-5 TM L-1, three land occupation scenarios were characterized: past (2007), current (2024) and future. For each of the scenarios, flood hydrographs were simulated, considering intense precipitation events. In addition, the efficiency and costs of implementing a proposed detention basin for flood control in the watershed were quantified. The results show that urbanization promotes high increases in the volume of surface runoff and maximum flows, aggravating flooding. The implementation of the detention basin is effective in reducing flood peaks, contributing to the mitigation of the impacts of urban flooding. However, the need for an extremely high storage volume for the detention basin at the critical point of the study reveals the unfeasibility of this solution, indicating that it may not be the most appropriate approach for the case analyzed.

Keywords: Urbanization. Floods. Hydrological Modeling. Detention Basin. ABC 6.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Processo de urbanização e geração de problemas hidrológicos	29
Figura 2 – Triângulo representativo da relação entre ameaça, vulnerabilidade e exposição.....	30
Figura 3 – Triângulo de risco adaptado para o caso das cheias em bacias hidrográficas urbanas.....	32
Figura 4 - Esquema de atuação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC)	33
Figura 5 – Dados do SNIS referentes a Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (DMAPU), ano base 2022	36
Figura 6 – Perfil fluvial de um rio	39
Figura 7 – Representação de uma enchente.....	40
Figura 8 – Representação de uma inundação	40
Figura 9 – Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS	41
Figura 10 – Representação de um alagamento.....	41
Figura 11 – Representação de um alagamento urbano, no bairro do Varadouro, próximo à estação ferroviária no município de João Pessoa – PB	42
Figura 12 - Sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas e suas dimensões	50
Figura 13 – Representação de reservatórios (bacias) de retenção.....	53
Figura 14 – Interface do <i>software</i> ABC 6	54
Figura 15 - Fluxograma com métodos e funções disponíveis no <i>software</i> ABC 6....	56
Figura 16 – Dinâmica urbana e ocupação territorial na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, conforme dados da plataforma Filipeia	60
Figura 17 – Ponto crítico de inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	63
Figura 18 – Ponte sobre o Rio Cuiá	63
Figura 19 – Inundação registrada em maio de 2012.....	64
Figura 20 – Registro de inundação ocorrida em maio de 2022.....	64
Figura 21 – Inundação ocorrida em 28 de maio de 2024.....	65
Figura 22 – Ponto de exutório (circulo) escolhido para delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	66

Figura 23 – Forma do hidrograma unitário sintético triangular do SCS.....	83
Figura 24 – Esquema utilizado no <i>software</i> ABC 6 para determinação da vazão	85
Figura 25 – Exemplo dos dados de entrada no <i>software</i> ABC 6.....	86
Figura 26 – Exemplo de entrada de dados no <i>software</i> ABC 6 na aba infiltração....	87
Figura 27 – Chuva de projeto aplicada no <i>software</i> ABC 6.....	87
Figura 28 – Escoamento em dispositivo do tipo orifício de fundo	90
Figura 29 - Escoamento em dispositivo do tipo descarregador de fundo.....	91
Figura 30 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos e ocupações do solo no Cenário I	94
Figura 31 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos do solo no Cenário II	96
Figura 32 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos do solo no Cenário III	98
Figura 33 – Passos para pré-dimensionamento do reservatório (bacia de retenção)	105
Figura 34 – Resultado da aplicação do método de Puls	109
Figura 35 – Esboço (sem escala definida) do reservatório (bacia de retenção) pré-dimensionado.....	110
Figura A-1 – Hidrogramas de cheias obtidos para cada uma das sub-bacias hidrográficas nos três cenários estudados	123
Figura C-1 – Comparação das vazões nas condições: sem e com bacia de retenção a jusante do exutório 05 (ponto crítico)	128

GRÁFICOS

Gráfico 1 - CENSO Demográfico 1950/2010: população por situação de domicílio (urbana e rural)	26
Gráfico 2 – Crescimento populacional brasileiro de 1872 a 2022	26
Gráfico 3 - Quantidade de óbitos anuais devido aos eventos hidrológicos no Brasil entre 1991-2023, em intervalos de 5 anos.	44
Gráfico 4 – Mortes relacionadas com inundações e enxurradas no Brasil, em intervalos de 10 anos, a partir de 1948	46
Gráfico 5 – Danos totais em bilhões de dólares (US\$), relacionados a desastres hidrológicos de inundação e enxurrada de 1948-2024	47

Gráfico 6 – Precipitação média mensal na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, na estação pluviométrica 734038 considerando o período de 1998 e 2019	59
Gráfico 7 – 15 maiores eventos de chuva, em escala diária registrados na estação pluviométrica 734038 entre 1998 e 2019	59
Gráfico 8 – Chuva de projeto, com TR de 50 anos com blocos de chuva reordenados pelo método dos blocos alternados	78
Gráfico 9 – Hidrogramas resultantes nos três cenários no exutório da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	103
Gráfico 10 – Hidrogramas resultantes no exutório da sub-bacia 05 do Rio Cuiá ...	104
Gráfico 11 – Curva cota-volume obtida para a bacia de retenção.....	107
Gráfico 12 – Curva cota-descarga obtida para a bacia de retenção	108
Gráfico 13 – Comportamento do vertedor x descarregador (orifício) de fundo da bacia de retenção	108
Gráfico 14 – Curva auxiliar função $Q = f^2 * St\Delta t + Q_t$ obtida para a bacia de retenção	108
Gráfico 15 – Hidrogramas de entrada e saída, após reservatório (bacia de retenção)	109
Gráfico 16 – Hidrograma resultante no exutório da Bacia do Rio Cuiá após instalação do reservatório (bacia de retenção) do tipo “on-line”	111

MAPAS

Mapa 1 – Localização da área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	57
Mapa 2 – Bairros que estão inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	58
Mapa 3 – Perfil Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, obtido através do MDE <i>Copernicus GLO-30</i>	61
Mapa 4 – Curvas de nível obtidas através do MDE <i>Copernicus GLO-30</i> para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	61
Mapa 5 – Declividade obtida através do MDE <i>Copernicus GLO-30</i> para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	62
Mapa 6 – Divisão em sub-bacias hidrográficas para realização das simulações hidrológicas.....	66
Mapa 7 – Uso do solo (em 2007) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	67
Mapa 8 – Uso do solo atual (em 2024) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	68

Mapa 9 – Informações utilizadas para determinação do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	74
Mapa 10 – Tipo de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	79
Mapa 11 – Mapa de uso e ocupação do solo obtido com base na classificação supervisionada para o Cenário I (passado).....	93
Mapa 12 – Mapa de uso e ocupação do solo obtido com base na classificação supervisionada para o Cenário II (atual).....	95
Mapa 13 – Uso e ocupação do solo no Cenário III (futuro) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	97
Mapa 14 – Local proposto para instalação do reservatório “on-line”	110

QUADROS

Quadro 1 – Etapas do processo de urbanização nas cidades	27
Quadro 2 – Principais consequências do processo de urbanização das cidades	27
Quadro 3 – Relação dos efeitos hidrológicos ligados a urbanização	37
Quadro 4 – Tipos de enchentes em áreas urbanas	39
Quadro 5 – Classificação das medidas de controle de inundações	49
Quadro 6 – Cenários utilizados na análise e proposição da solução	68
Quadro 7 – Valores de Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento em trechos de superfície	71
Quadro 8 – Valores de Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento em trechos de canais naturais e artificiais	72
Quadro 9 - Períodos de retorno propostos para projetos de drenagem urbana em São Paulo - SP.....	75
Quadro 10 - Tipos de solos considerados no método SCS-CN para a determinação do valor do parâmetro CN	81
Quadro 11 - Valores de CN para bacias hidrográficas urbanas e suburbanas	81
Quadro 12 – Grupo de solos do método SCS aplicado no Brasil	82
Quadro 13 – Exemplificação de cálculo de um hidrograma em planilha de cálculo eletrônica	85
Quadro 14 – Passos para simulação utilizados na bacia de retenção	91
Quadro 15 – Valores adotado para o CN, segundo o uso obtido na classificação supervisionada.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de registros oficiais de desastres causados por eventos hidrológicos entre 1991-2023	43
Tabela 2 – Danos e custos causados por eventos hidrológicos entre 1991-2023	45
Tabela 3 – Quantitativo de pessoas afetadas por inundações no Brasil, em intervalos de 10 anos, a partir de 1948	46
Tabela 4 – Resumo dos cálculos para o tempo de concentração para determinação da chuva de projeto.....	74
Tabela 5 - Blocos de chuva de 15 minutos de duração cada um organizados em ordem decrescente	77
Tabela 6 – Informações relativas ao principal curso d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	92
Tabela 7 - Informações relativas a divisão das sub-bacias hidrográficas do Rio Cuiá	92
Tabela 8 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade <i>pixel</i> para o Cenário I	94
Tabela 9 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade <i>pixel</i> para o Cenário II	95
Tabela 10 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade <i>pixel</i> para o Cenário III	98
Tabela 11 – Valores adotados para o CN, em cada uma das sub-bacias hidrográficas nos cenários de estudo	99
Tabela 12 – Tempos de concentração em minutos, para as sub-bacias hidrográficas nos três cenários de estudo	100
Tabela 13 - Redução percentual do tempo de concentração (T_c) para cada sub-bacia hidrográfica em relação ao Cenário I	100
Tabela 14 - Vazões de pico (em m^3/s) e tempos de picos (T_p) nos três cenários de estudo para cada sub-bacia hidrográfica.....	101
Tabela 15 – Comparação percentual da vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$) e do tempo de pico (T_p) para cada sub-bacia hidrográfica em relação ao Cenário I	102
Tabela 16 – Estimativa de volumes escoados (m^3) em cada um dos cenários nas nove sub-bacias hidrográficas	102

Tabela 17 - Vazão de pico (em m ³ /s) no exutório da bacia.....	103
Tabela 18 - Vazões de pico (em m ³ /s) no ponto crítico, correspondente ao exutório da sub-bacia hidrográfica 05.....	104
Tabela 19 – Relação cota-volume do reservatório (bacia de retenção) obtidas com uso das equações para o método de Puls	106
Tabela B-1 - Passos de cálculo do pré-dimensionamento da bacia de retenção pelo método de Puls	125
Tabela D-1 – Dados de entrada utilizados na aba “Dados da bacia” no <i>software</i> ABC 6 para os 3 cenários, parte I.....	130
Tabela D-2 – Dados de entrada utilizados na aba “Dados da bacia” no <i>software</i> ABC 6 para os 3 cenários, parte II.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Cemaden	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CN	Curve Number
EM-DAT	The International Disaster Database
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
HUT	Hidrograma Unitário Sintético Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LabSid	Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados à Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos
MCidades	Ministério das Cidades
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MIDR	Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
N.A	Nível d'água
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
POLI USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PSScene	PlanetScope Scene
PVAd5	Podzólico Vermelho-Amarelo (PVAd5)
S2iD	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

SCS	Soil Conservation Service
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil Nacional
SGB/CPRM	Serviço Geológico Brasileiro
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSD ABC	Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheia em Bacias Complexas
UTM	Universal Transverse Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d	Área de drenagem da bacia hidrográfica
A_{st}	Área molhada da seção transversal
I_t	Vazão de entrada em um dado tempo t
L_{esc}	Comprimento do trecho
L_{trecho}	Comprimento do trecho de talvegue
P_{24}	Precipitação com 24 horas de duração
P_{ev}	Probabilidade de excedência
P_i	Trecho de escoamento em canal ou rio
P_m	Perímetro molhado
Q_p	Vazão de pico
Q_t	Vazão de saída em um dado tempo t
R_h	Raio hidráulico
S_i	Trecho de escoamento em superfície
S_L	Declividade longitudinal de fundo do canal
T_{P_i}	Tempo de escoamento em trecho de canal
T_b	Tempo de base
T_c	Tempo de concentração
t_d	Duração da chuva
T_p	Tempo de pico
T_{rec}	Tempo de recessão
T_s	Tempo de subida
T_{s_i}	Tempo de escoamento trecho de superfície

I	Intensidade da chuva
Ø	Diâmetro
S	Declividade do terreno
TR	Tempo de retorno
V	Velocidade do escoamento
n	Coefficiente de rugosidade de Manning

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. Objetivo geral	24
1.1.1. Objetivos específicos	24
1.2. Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Cheias em Bacias Hidrográficas.....	25
2.1.1. Urbanização das cidades.....	25
2.1.2. Problemas do crescimento urbano.....	28
2.1.3. A urbanização e a Defesa Civil	32
2.1.4. Urbanização e alterações no ciclo hidrológico	37
2.1.5. Tipos de inundações em ambiente urbano.....	38
2.1.6. Casos recentes	42
2.1.7. Tendência de soluções	47
2.2. Soluções para contenção de cheias.....	49
2.2.1. Drenagem urbana	49
2.2.2. Macrodrenagem.....	52
2.3. Modelagem computacional com uso do ABC 6.....	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1. Área de estudo	56
3.2. O problema.....	62
3.3. Delimitação da Bacia Hidrográfica e discretização espacial	65
3.3.1. Determinação dos cenários de estudo	67
3.3.2. Determinação do tempo de concentração (Tc).....	70
3.3.3. Determinação do Tempo de Retorno (TR)	75
3.3.4. Determinação da chuva de projeto	76

3.3.5.	Determinação do tipo de solo	78
3.3.6.	Determinação da chuva efetiva	79
3.3.7.	Determinação dos hidrogramas de cheia	82
3.3.8.	Modelagem hidrológica no ABC 6	85
3.4.	Pré-dimensionamento de bacia de retenção	88
3.4.1.	Estruturas de saída de bacias de retenção	89
3.4.2.	Simulação	91
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4.1.	Caracterização do uso e ocupação do solo nos cenários de estudo ..	93
4.1.1.	Cenário I (passado - 2007)	93
4.1.2.	Cenário II (atual - 2024)	95
4.1.3.	Cenário III (futuro).....	96
4.2.	Análise do parâmetro CN	99
4.3.	Análise do escoamento superficial	100
4.3.1.	Análise do tempo de concentração (Tc)	100
4.3.2.	Obtenção dos hidrogramas de cheia	101
4.4.	Avaliação de implantação de uma bacia de retenção	105
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	112
	REFERÊNCIAS	116
	APÊNDICE A - Hidrogramas de cheias obtidos para cada uma das sub-bacias hidrográficas nos três cenários de estudo	123
	APÊNDICE B - Passos de cálculo do pré-dimensionamento da bacia de retenção	125
	APÊNDICE C - Comparação das vazões nas condições sem e com bacia de retenção a jusante do exutório 05	128
	APÊNDICE D - Resumo dos dados de entrada utilizados no <i>software</i> ABC 6	130

1. INTRODUÇÃO

Segundo as Nações Unidas (2019), 55% da população mundial vive em áreas urbanas, com a expectativa de que essa proporção aumente para 70% até 2050. Este crescimento tem exercido um estresse sobre a infraestrutura urbana, o meio ambiente e a provisão de serviços públicos.

No Brasil, o desenvolvimento, evidenciado pelo surgimento de novas construções desde a década de 1960, tem sido marcado por um crescimento acelerado e desordenado como destacam Stein *et al.* (2021, p. 101). Esse processo tem resultado em uma infraestrutura inadequada, afetando os recursos hídricos e contribuindo para a degradação ambiental, além de aumentar a vulnerabilidade a desastres relacionados com a intensificação dos fenômenos naturais, como as chuvas extremas, que se tornaram mais frequentes no decorrer dos últimos anos.

As mudanças climáticas, um dos maiores desafios do século 21, obrigam governos e instituições a se adaptarem, especialmente em áreas urbanas e regiões metropolitanas. Essas áreas, intensamente transformadas pela atividade humana, são as mais afetadas pelo crescimento urbano desordenado. O manejo inadequado dos recursos naturais nessas regiões frequentemente resulta em um processo de urbanização inadequado (Mendonça e Monteiro, 2022, p. 69).

A urbanização de bacias hidrográficas provoca diversas mudanças no ciclo hidrológico, sendo a impermeabilização um dos principais fatores. Áreas anteriormente cobertas por vegetação ou solo natural tornam-se impermeáveis devido à construção de casas, ruas e estacionamento, o que impede a infiltração da chuva no solo, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial. Além disso, ocorre a retificação ou substituição de cursos d'água naturais por canalizações, o que reduz o tempo de concentração, especialmente com a construção de condutos e canais que aceleram o escoamento (Tucci, 2007).

Os eventos de cheias no Brasil são agravados por diversos fatores, como o lançamento de resíduos sólidos nas ruas e a falta de investimento em ações preventivas e na manutenção adequada da rede de drenagem (Wolff *et al.*, 2016). Isso demonstra que o país não tem dado a devida importância ao tema, uma vez que áreas

inundadas apresentam riscos consideráveis, incluindo danos à infraestrutura, perdas econômicas e riscos à saúde pública devido à contaminação da água, à proliferação de doenças e causando até mesmo mortes.

Porém, com o crescente número de eventos climáticos extremos, várias organizações foram criadas para lidar com o risco de desastres relacionados a fenômenos naturais. No Brasil, essa função é desempenhada pelo Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC), estabelecido em 2012 com a promulgação da Lei Federal Nº 12.608, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e dá outras providências. Essa lei determina, em seu art. 4º, que a bacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de análise para a prevenção de desastres relacionados a corpos d'água (BRASIL, 2012).

Além disso, desde dezembro de 2011, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) opera de forma ininterrupta com uma equipe multidisciplinar monitorando sistemas meteorológicos, condições hidrológicas e geodinâmicas, e possíveis impactos socioambientais de desastres relacionados a fenômenos naturais em diversos municípios do país. A avaliação considera o tipo de risco, condições meteorológicas atuais e previstas, volume acumulado de precipitação, e nível do rio, sendo essencial para emitir alertas de risco (Cemaden, 2021).

Informações preocupantes do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS) revelam que, em 2022, 69,8% dos municípios brasileiros ainda não possuíam um mapeamento adequado das áreas propensas a risco de inundação. A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá é uma das mais afetadas pela expansão urbana no município de João Pessoa - PB, capital do estado da Paraíba, principalmente nos bairros de Mangabeira e Valentina, que, desde 1990, têm sido alvo de especulação imobiliária (João Pessoa, 2024). Registros de noticiários mostram que, desde 2012, a região tem sofrido com constantes inundações e alagamentos nos períodos de chuva mais intensos.

Um caminho para mitigar esses problemas consiste no planejamento urbano e na implementação de sistemas de saneamento básico, que, desde o Marco do Saneamento Básico, Lei Nº 14.026/2020, compreendem também o sistema de

drenagem urbana e controle de inundações. Além disso o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) foi criado para auxiliar no planejamento e monitoramento de áreas suscetíveis a risco de desastres relacionados com fenômenos naturais.

Estudos hidrológicos por meio de modelos matemáticos têm sido considerados adequados para estimar vazões de cheia por diversos autores, como Tucci (2007), Canholi (2014) e Collischonn e Dornelles (2015). O uso de modelos permite avaliar os impactos que podem ocorrer em diversos cenários de evolução da ocupação da bacia hidrográfica, bem como propor soluções para intervir ou remediar esses eventos.

Nesse contexto, este estudo visou avaliar os impactos da urbanização sobre as inundações urbanas na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, localizada no município de João Pessoa – PB, por meio de três cenários distintos de uso e ocupação do solo, avaliando a implantação de uma bacia de retenção para reduzir os impactos resultantes da urbanização na região. Justificado pela frequência de inundações após chuvas, no qual, um dos pontos mais afetados está na ligação entre os bairros de Mangabeira e Valentina no trecho que compreende a ponte sobre o Rio Cuiá, localizado nas coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) Zona 25S 9.204.487,38 N e 296.861,11 E, correspondentes as coordenadas no formato WGS84 (*World Geodetic System 1984*) -7,193 de latitude e -34,839 de longitude.

1.1. Objetivo geral

Avaliar por meio de modelagem hidrológica, com uso de três cenários os impactos da urbanização sobre o padrão de cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá.

1.1.1. Objetivos específicos

- Caracterizar a evolução da ocupação na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá ao longo do tempo.
- Estimar hidrogramas de cheia para três diferentes cenários de ocupação do solo, passado, atual e futuro.
- Quantificar a eficiência da implantação de uma bacia de retenção no controle de cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá.

1.2. Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso

Este estudo foi estruturado em cinco itens, organizados de forma a proporcionar uma leitura fluída e agradável. No item 1 tem-se a Introdução, no qual está contextualizado o trabalho. No item 2, é apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste estudo, abordando temas como o processo de urbanização no Brasil, inundações, drenagem, modelagem hidrológica e o histórico de eventos no país. O item 3 descreve a metodologia e os recursos utilizados para o desenvolvimento do estudo, incluindo a descrição da área de estudo, o processamento do modelo digital de elevação (MDE), a rede de drenagem, o processo para determinação da chuva de projeto, os modelos hidrológicos e seus parâmetros, além de definir o problema alvo. No item 4, são apresentados os resultados e discussões das simulações hidrológicas e do pré-dimensionamento da bacia de detenção. Finalmente, no item 5, são trazidas as conclusões, recomendações e sugestões de estudos futuros que podem ser realizados na região.

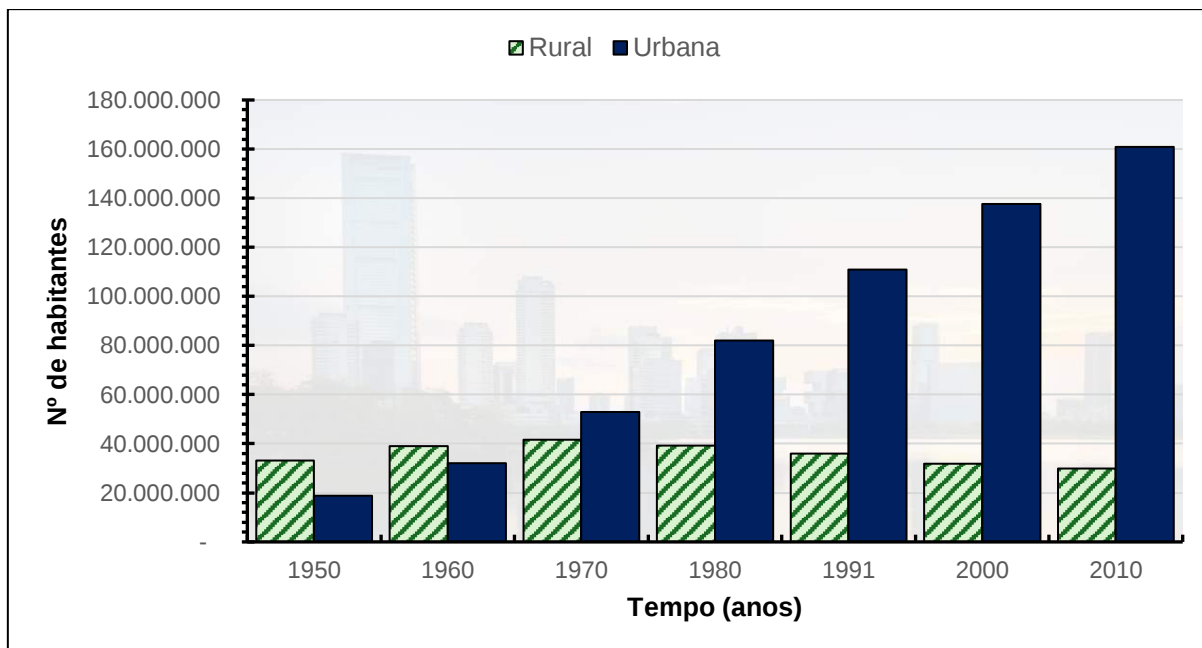
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cheias em Bacias Hidrográficas

2.1.1. Urbanização das cidades

Desde 1930, o Brasil tem experimentado uma expansão urbana, resultando em mudanças expressivas na infraestrutura, economia e sociedade. O censo de 1970 confirmou que a população urbana já superava a rural (Brito, Horta e Amaral, 2018). O Gráfico 1, com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), confirma que a população urbana tem aumentado continuamente. Essa tendência de urbanização tem implicações importantes para o planejamento e a gestão das cidades.

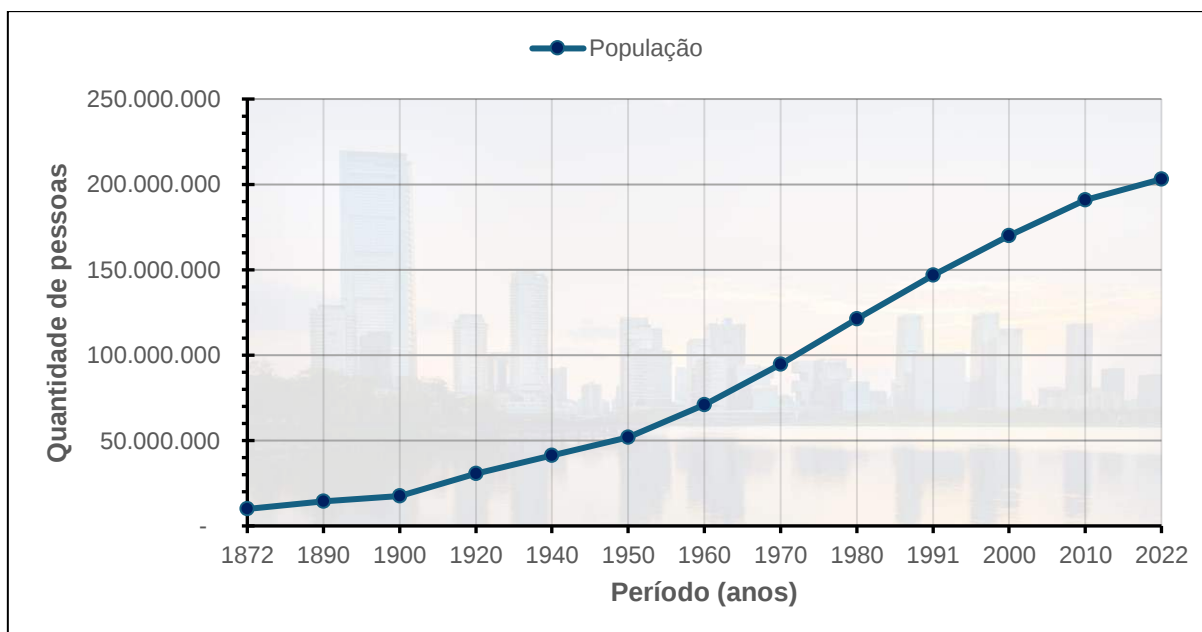
Gráfico 1 - CENSO Demográfico 1950/2010: população por situação de domicílio (urbana e rural)



Fonte: adaptado de IBGE (2022).

O Gráfico 2, baseado em dados do IBGE (2024), apresenta a evolução da população geral do Brasil. Pode-se observar que, desde 1872, houve um aumento praticamente constante da população.

Gráfico 2 – Crescimento populacional brasileiro de 1872 a 2022



Fonte: adaptado de IBGE (2024).

De acordo com Stein *et al.* (2021, p. 101), o desenvolvimento de um país, como o Brasil, pode ser evidenciado pelo surgimento de novas construções. Esse desenvolvimento, especialmente nas cidades brasileiras desde a década de 1960, tem sido marcado por um crescimento acelerado sem o devido planejamento urbano, resultando em uma infraestrutura básica inadequada para atender às necessidades da população. Isso impacta também os recursos hídricos, contribuindo para a degradação do ambiente e aumentando a susceptibilidade da população a risco de desastres relacionados a eventos naturais, como enchentes e inundações, que têm se tornado cada vez mais frequentes em todo o país.

Botelho (2018, p. 17) argumenta que as cidades, antes da urbanização, eram moldadas por milênios de transformações naturais, com fenômenos como chuva e vento contribuindo para sua conformação equilibrada. A partir da chegada da urbanização, iniciando-se pelo processo de loteamento dessas áreas, reduz-se a interceptação vegetal, que diminuía a quantidade de água pluvial que atinge o solo, conforme explicam Collischonn e Dornelles (2015, p. 78). O Quadro 1 detalha o processo de urbanização típico nas cidades.

Quadro 1 – Etapas do processo de urbanização nas cidades

Etapas	Descrição
1	Consiste na retirada considerável de parte de sua vegetação (que a protegia da ação erosiva das águas pluviais).
2	Abrem-se ruas, fazendo-se cortes e aterros no terreno.
3	Criar <i>plateau</i> (que é uma área de terreno bastante nivelado, ou seja, plano) para as edificações.
4	Inicia-se a construções de edificações nos lotes.
5	É realizada a pavimentação das ruas.
6	A população começa a morar na área.

Fonte: adaptado de Botelho (2018, p. 17).

Consequentemente, um novo cenário é criado, diferente do original. No entanto, a precipitação persiste na área, seguindo seu próprio curso. Se medidas preventivas não forem implementadas na área recém-urbanizada, podem surgir vários problemas, conforme abordado por Botelho (2018, p. 17-18) e apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Principais consequências do processo de urbanização das cidades

Principais consequências da urbanização
Erosões no terreno.

Principais consequências da urbanização
Desbarrancamentos.
Danificação de pavimentos devido as altas velocidades de escoamento da água nas ruas.
Criação de pontos baixos (depressões) onde a água se acumulará.
Ocupação por prédios de locais de escoamento natural das águas (pontos baixos e fundos de vale). A ocupação desses locais impede o escoamento da água, exigindo obras posteriores de correção
Assoreamento dos córregos pelo acúmulo de material erodido dos terrenos.

Fonte: adaptado de Botelho (2018, p. 18).

2.1.2. Problemas do crescimento urbano

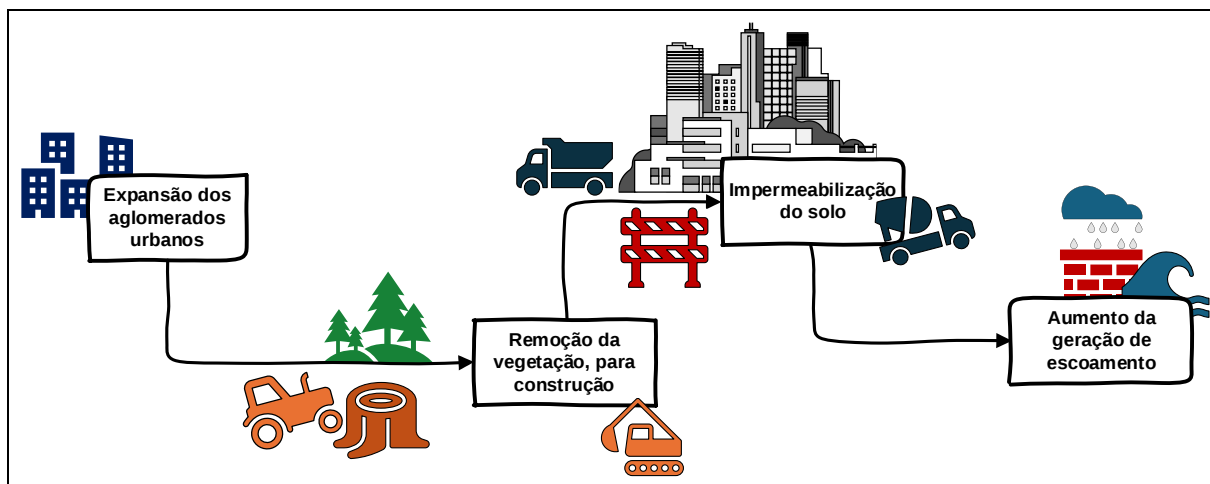
As áreas urbanas e regiões metropolitanas são as mais afetadas por problemas relacionados ao crescimento urbano, pois correspondem aos segmentos da superfície terrestre que foram, e continuam sendo, os mais intensamente transformados pela atividade humana. Essa atividade é constante nessas áreas e, principalmente devido ao manejo inadequado dos recursos naturais, resultando frequentemente em uma urbanização inadequada (Mendonça e Monteiro, 2022, p. 69).

O crescimento acelerado e desordenado da população urbana gera uma série de problemas. Miguez (2017) destaca que um dos principais desafios é a falta de infraestrutura adequada para acompanhar esse crescimento, resultando em uma variedade de problemas sociais e ambientais, como a favelização, que ocorre com a ocupação de áreas inadequadas; a poluição do ar e da água; e a perda de ecossistemas e biodiversidade.

Ao longo dos últimos 20 anos, autores como Tucci (2003) já alertavam para o crescimento da população urbana que, segundo ele, ocorre principalmente nas periferias das grandes cidades, onde as pessoas ocupam áreas de rios, córregos e mananciais, além de locais com risco de inundação e deslizamento. A impermeabilização do solo, segundo a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2014, p. 6), é a perda da capacidade de infiltração das águas provocada pelo adensamento urbano, sendo um dos principais fatores que impactam diretamente no escoamento superficial de uma localidade, tornando as cidades vulneráveis a enchentes.

No contexto deste estudo, o processo de urbanização está intrinsecamente ligado a problemas hidrológicos. A Figura 1 demonstra a sequência de eventos resultantes da urbanização que afetam a hidrologia local.

Figura 1 – Processo de urbanização e geração de problemas hidrológicos



Fonte: elaboração própria (2024).

Para Cortese e Natalini (2014, p. 115), as mudanças climáticas locais são consequências do desenvolvimento urbano, caracterizado pela verticalização das cidades, compactação do solo, supressão de vegetação e aterramento dos cursos d'água. Esse desenvolvimento, impulsionado pela rápida urbanização sem infraestrutura adequada, deixa as cidades despreparadas para as mudanças climáticas.

A urbanização resulta em um aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial (Miguez, 2017). Essa é uma consequência direta das atividades de desenvolvimento urbano. Segundo Miguez, Veról e Rezende (2015), as atividades humanas no processo de urbanização das cidades alteram o uso do solo e a qualidade do ambiente natural e construído. Tais ações resultam na degradação, gerando impactos ambientais que culminam na intensificação dos problemas de enchentes urbanas, pois o desenvolvimento urbano tende a remover a vegetação original, aumentar a impermeabilização, introduzir obras de canalização e ocupar planícies ribeirinhas.

A soma dessas ações resulta no agravamento das cheias, causando perdas econômicas e sociais, danos à infraestrutura e habitações, degradação do ambiente e empobrecimento da população (Miguez, Veról e Rezende, 2015). A urbanização desordenada e sem planejamento resulta em problemas de infraestrutura, como consumo excessivo de água, geração e destinação inadequada de resíduos, e esgoto

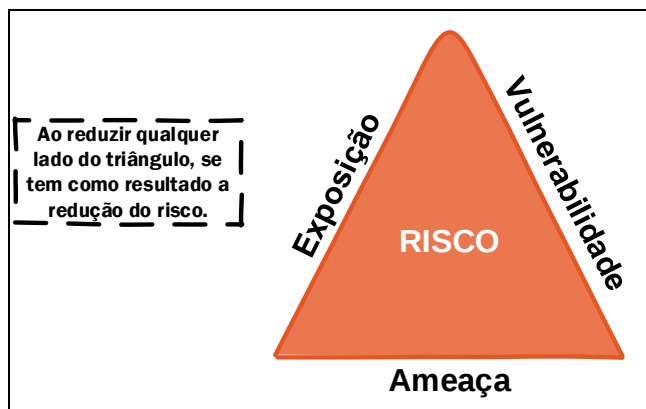
inadequado nas ruas devido à falta de saneamento. Isso pode levar à propagação de doenças de veiculação hídrica, como a leptospirose (Calijuri e Cunha, 2019).

A urbanização desordenada, sem o devido planejamento, acaba ocasionando problemas de infraestrutura, como a falta de saneamento, além de consumo excessivo de água, geração significativa e destinação inadequada de resíduos aumenta a vulnerabilidade da população aos eventos de cheias urbanas, em função da maior possibilidade de ocorrência de doenças de veiculação hídrica. A falta de ordenamento do uso do solo e de fiscalização, por sua vez, permite que pessoas residam em áreas de risco, nas faixas marginais aos rios, em planícies alagáveis e em encostas de morros. Essa situação aumenta a exposição da população durante os eventos de chuvas (Miguez, 2017, p. 18).

Para Miguez (2017) o problema das cheias urbanas se materializa como um dos principais desafios das grandes cidades. Diante das mudanças climáticas, de maneira geral, todos os indivíduos estão sujeitos a riscos, embora em graus variados. Segundo Roaf, Crichton e Nicol (2009), a diferença é que alguns são menos vulneráveis, enquanto para outros, esses riscos podem ser catastróficos. Portanto, é de fundamental importância entender a extensão dos riscos para sermos capazes de proteger, no futuro, as vidas dos indivíduos diante das mudanças que estão por vir.

Conforme proposto por Crichton (2001, p. 4), o risco pode ser visualizado como um triângulo, no qual os lados representam a vulnerabilidade, a exposição e a ameaça (Figura 2), de modo que a sua área total simboliza o risco. Assim, ao diminuir qualquer um dos lados do triângulo, conseqüentemente, reduz-se a área total, ou seja, o risco.

Figura 2 – Triângulo representativo da relação entre ameaça, vulnerabilidade e exposição



Fonte: adaptado de Roaf, Crichton e Nicol (2009, p. 81).

O risco decorrente de inundações, segundo Treby, Clark e Priest (2006), é uma combinação da natureza do “perigo físico” com a exposição relativa e a vulnerabilidade a ele. De acordo com Miguez (2017), esse risco, está realmente em crescimento. A Defesa Civil, no Brasil, desenvolveu o Glossário de Defesa Civil, produzido pelo Ministério da Integração Nacional, atual Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional (MIDR), que apresenta cinco definições de risco, conforme descrito a seguir:

1. Medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis.
2. Probabilidade de ocorrência de um acidente ou evento adverso, relacionado com a intensidade dos danos ou perdas, resultantes dos mesmos.
3. Probabilidade de danos potenciais dentro de um período especificado de tempo e/ou de ciclos operacionais.
4. Fatores estabelecidos, mediante estudos sistematizados, que envolvem uma probabilidade significativa de ocorrência de um acidente ou desastre.
5. Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente determinado se concretize e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos. (BRASIL, 2005, p. 163)

Enquanto a vulnerabilidade é definida como:

1. Condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor que, em interação com a magnitude do evento ou acidente, caracteriza os efeitos adversos, medidos em termos de intensidade dos danos prováveis.
2. Relação existente entre a magnitude da ameaça, caso ela se concretize, e a intensidade do dano consequente.
3. Probabilidade de uma determinada comunidade ou área geográfica ser afetada por uma ameaça ou risco potencial de desastre, estabelecida a partir de estudos técnicos.
4. Corresponde ao nível de insegurança intrínseca de um cenário de desastre a um evento adverso determinado. Vulnerabilidade é o inverso da segurança (BRASIL, 2005, p. 188).

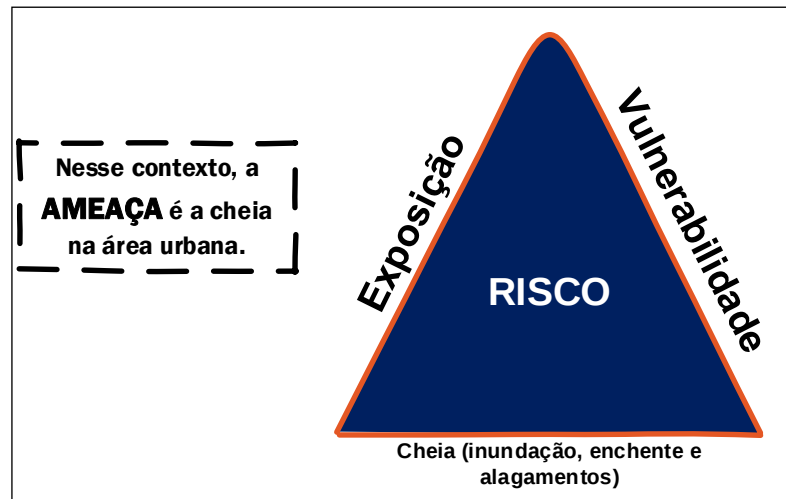
E por fim a ameaça é definida como:

1. Risco imediato de desastre. Prenúncio ou indício de um evento desastroso. Evento adverso provocador de desastre, quando ainda potencial.
2. Estimativa da ocorrência e magnitude de um evento adverso, expressa em termos de

probabilidade estatística de concretização do evento (ou acidente) e da provável magnitude de sua manifestação (BRASIL, 2005, p. 18).

Portanto, no contexto deste estudo, o triângulo de risco é adaptado para a seguinte situação, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Triângulo de risco adaptado para o caso das cheias em bacias hidrográficas urbanas



Fonte: adaptado de Roaf, Crichton e Nicol (2009, p. 81).

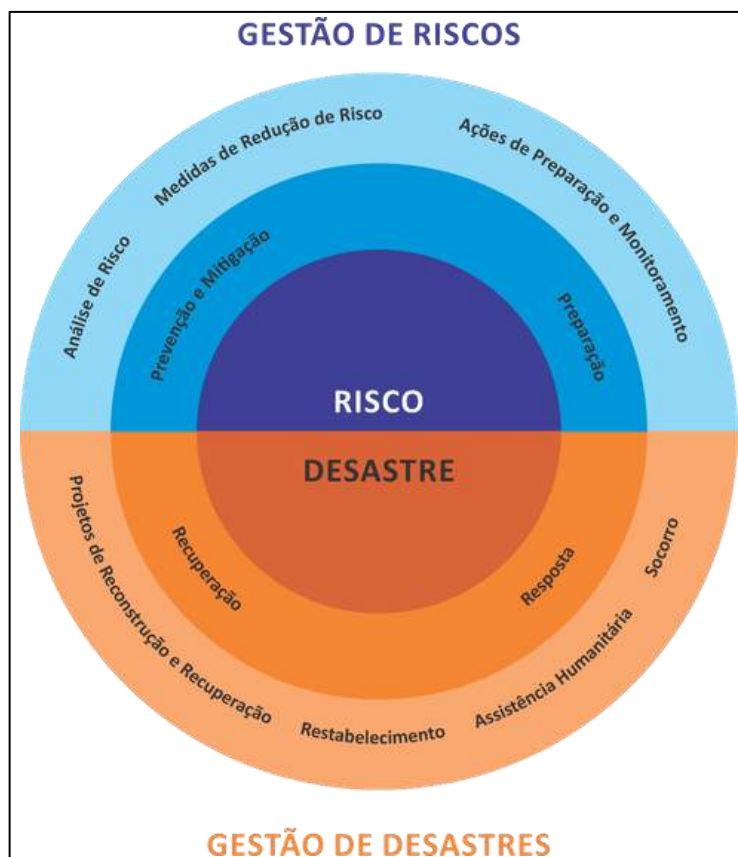
2.1.3. A urbanização e a Defesa Civil

Com o crescente número de eventos climáticos extremos, várias organizações foram criadas para lidar com a temática dos desastres relacionados com fenômenos naturais. Além disso, serviços públicos foram desenvolvidos para proteger a sociedade civil. No Brasil, essa função é desempenhada pelo Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) estabelecido em 2012 com a promulgação da Lei Federal Nº 12.608. Essa lei instituiu a PNPDEC, que delega à União a responsabilidade de implementar e executar a política, apoiar estados e municípios no mapeamento de áreas propensas a risco de desastres e auxiliar em ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação de desastres (BRASIL, 2012).

O SINPDEC é coordenado por estruturas institucionais e está ligado ao MIDR. Por meio da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil Nacional (SEDEC), o MIDR é responsável por reconhecer situações de emergência e autorizar o repasse de recursos para ações de defesa civil em cidades afetadas por desastres. O SINPDEC tem como objetivo reunir todas as competências necessárias para a gestão

de riscos e desastres, sempre com ênfase na prevenção (MIDR, 2021). A Figura 4 ilustra a linha de atuação do SINPDEC.

Figura 4 - Esquema de atuação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC)



Fonte: MIDR (2021).

O SINPDEC é composto por órgãos e entidades públicas e privadas, com o objetivo de proteger e defender a população em situações de desastre. O Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) atua como órgão consultivo, enquanto a SEDEC coordena o sistema em nível nacional. Os órgãos estaduais e municipais também desempenham papéis de coordenação dentro de seus respectivos sistemas. A meta final é unir esforços públicos e privados para construir uma sociedade mais resiliente (MIDR, 2021).

A Lei Nº 14.750, de 12 de dezembro de 2023, altera as Leis Nºs 12.608, de 10 de abril de 2012, e 12.340, de 1º de dezembro de 2010, com o objetivo de aprimorar os instrumentos de prevenção de acidentes ou desastres e de recuperação de áreas atingidas por eles. Além disso, a Lei busca melhorar as ações de monitoramento de riscos de acidentes ou desastres e a produção de alertas antecipados. A Lei também define novos termos e conceitos relacionados à prevenção de desastres e estabelece

responsabilidades para diferentes níveis de governo (BRASIL, 2023). Segundo a Lei Nº 14.750/2023:

[..] **I - Acidente:** evento definido ou sequência de eventos fortuitos e não planejados que dão origem a uma consequência específica e indesejada de danos humanos, materiais ou ambientais; [..]

III - Desabrigado: pessoa que foi obrigada a abandonar sua habitação de forma temporária ou definitiva em razão de evacuações preventivas, de destruição ou de avaria grave decorrentes de acidente ou desastre e que necessita de abrigo provido pelo SINPDEC ou pelo empreendedor cuja atividade deu causa ao acidente ou desastre;

IV - Desalojado: pessoa que foi obrigada a abandonar sua habitação de forma temporária ou definitiva em razão de evacuações preventivas, de destruição ou de avaria grave decorrentes de acidente ou desastre e que não necessariamente carece de abrigo provido pelo SINPDEC ou pelo empreendedor cuja atividade deu causa ao acidente ou desastre;

V - Desastre: resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais;

VI - Estado de calamidade pública: situação anormal provocada por desastre causadora de danos e prejuízos que implicam o comprometimento substancial da capacidade de resposta do poder público do ente atingido, de tal forma que a situação somente pode ser superada com o auxílio dos demais entes da Federação;

VII - Plano de contingência: conjunto de procedimentos e de ações previsto para prevenir acidente ou desastre específico ou para atender emergência dele decorrente, incluída a definição dos recursos humanos e materiais para prevenção, preparação, resposta e recuperação, elaborado com base em hipóteses de acidente ou desastre, com o objetivo de reduzir o risco de sua ocorrência ou de minimizar seus efeitos;

VIII - Prevenção: ações de planejamento, de ordenamento territorial e de investimento destinadas a reduzir a vulnerabilidade dos ecossistemas e das populações e a evitar a ocorrência de acidentes ou de desastres ou a minimizar sua intensidade, por meio da identificação, do mapeamento e do monitoramento de riscos e da capacitação da sociedade em atividades de proteção e defesa civil, entre outras estabelecidas pelos órgãos do SINPDEC;

IX - Preparação: ações destinadas a preparar os órgãos do SINPDEC, a comunidade e o setor privado, incluídas, entre outras ações, a capacitação, o monitoramento e a implantação de sistemas de alerta e da infraestrutura necessária para garantir resposta adequada aos acidentes ou desastres e para minimizar danos e prejuízos deles decorrentes;

X - Proteção e defesa civil: conjunto de ações de prevenção, de preparação, de resposta e de recuperação destinado a evitar ou a reduzir os riscos de acidentes ou desastres, a minimizar seus impactos socioeconômicos e ambientais e a restabelecer a normalidade social, incluída a geração de conhecimentos sobre acidentes ou desastres;

XI - Recuperação: conjunto de ações de caráter definitivo tomadas após a ocorrência de acidente ou desastre, destinado a restaurar os ecossistemas, a restabelecer o cenário destruído e as condições de vida da comunidade afetada, a impulsionar o desenvolvimento socioeconômico local, a recuperar as áreas degradadas e a evitar a reprodução das condições de vulnerabilidade, incluídas a reconstrução de unidades habitacionais e da infraestrutura pública e a recuperação dos serviços e das atividades econômicas, entre outras ações definidas pelos órgãos do SINPDEC;

XII - Resposta a desastres: ações imediatas com o objetivo de socorrer a população atingida e restabelecer as condições de segurança das áreas atingidas, incluídas ações de busca e salvamento de vítimas, de primeiros-socorros, atendimento pré-hospitalar, hospitalar, médico e cirúrgico de urgência, sem prejuízo da atenção aos problemas crônicos e agudos da população, de provisão de alimentos e meios para sua preparação, de abrigo, de suprimento de vestuário e produtos de limpeza e higiene pessoal, de suprimento e distribuição de energia elétrica e água potável, de esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem das águas pluviais, transporte coletivo, tráfegabilidade e comunicações, de remoção de escombros e desobstrução das calhas dos rios, de manejo dos mortos e outras estabelecidas pelos órgãos do SINPDEC;

XIII - Risco de desastre: probabilidade de ocorrência de significativos danos sociais, econômicos, materiais ou ambientais decorrentes de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis;

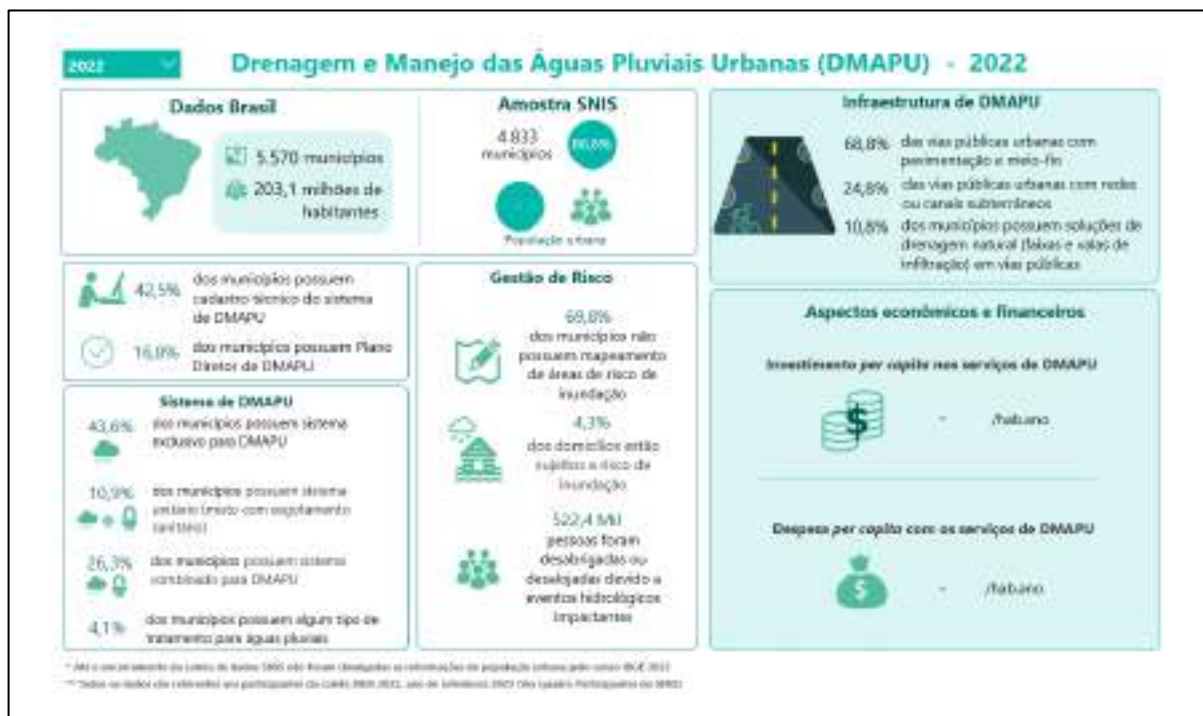
XIV - Situação de emergência: situação anormal provocada por desastre causadora de danos e

prejuízos que implicam o comprometimento parcial da capacidade de resposta do poder público do ente atingido e da qual decorre a necessidade de recursos complementares dos demais entes da Federação para o enfrentamento da situação; e

XV - Vulnerabilidade: fragilidade física, social, econômica ou ambiental de população ou ecossistema ante evento adverso de origem natural ou induzido pela ação humana.” (NR) [...] (BRASIL, 2023).

Informações do SNIS revelam que, em 2022, impressionantes 69,8% dos municípios brasileiros não possuíam um mapeamento adequado das áreas vulneráveis à risco de desastres por inundação (BRASIL, 2024), conforme ilustrado na Figura 5. Essa estatística ressalta a necessidade urgente de ações preventivas em todo o país.

Figura 5 – Dados do SNIS referentes a Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (DMAPU), ano base 2022



Fonte: Brasil (2024).

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden, 2023) afirma que, atrelado ao censo de 2010, no mínimo 825 municípios estão em situação de vulnerabilidade crítica a desastres. Entre as 8.266.566 pessoas em maior risco, aproximadamente 75% residem em áreas propensas a deslizamentos de terra ou a combinações de deslizamentos e inundações. Além disso, entre 1º de

janeiro de 2013 e 5 de abril de 2022, desastres relacionados com fenômenos naturais resultaram em prejuízos de US\$ 67 bilhões de dólares em todo o Brasil.

2.1.4. Urbanização e alterações no ciclo hidrológico

Quando uma bacia hidrográfica é urbanizada, ocorrem diversas mudanças. Conforme exposto por Aranda (2010, p. 10) anteriormente, uma grande parte da superfície era coberta por vegetação ou solo natural. No entanto, com a construção de casas, ruas, calçadas e estacionamentos, essa área torna-se impermeável. Os efeitos dessa impermeabilização são notáveis: a água de chuva já não infiltra com facilidade no solo, resultando em um aumento no volume de escoamento superficial. Além disso, a superfície torna-se mais lisa, permitindo um transporte mais rápido do fluxo e reduzindo a capacidade de armazenamento.

Aranda (2010, p. 10) explica ainda que, quando os cursos d'água naturais são retificados ou substituídos por tubulações, o resultado é um aumento no volume e na velocidade do escoamento, o que pode causar danos à infraestrutura e gerar gastos para repará-la. O Quadro 3 lista alguns dos problemas ocasionados pela urbanização no ciclo hidrológico.

Quadro 3 – Relação dos efeitos hidrológicos ligados a urbanização

Mudança no uso do solo ou da água	Efeito no ciclo hidrológico
1 - Mudança de terra natural para escassamente urbano.	
- Remoção da vegetação. - Construção de casas isoladas. - Perfuração de poços ou rodas d'água. - Construção de fossas sépticas.	- A transpiração das plantas diminui. - Ocorre o aumento da sedimentação. - Ocorre a redução do nível do lençol freático. - A umidade do solo aumenta, o lençol freático sobe e há poluição local.
2 - Mudança de escassamente urbano para semiurbano.	
- O terreno é nivelado para construção de casas. - Casas são construídas e as ruas pavimentadas. - Os poços são desativados. - A captação passa a ser realizada em fluxos da superfície (rios). - As águas residuais são descartadas.	- A sedimentação aumenta e pequenos canais são aterrados. - A infiltração diminui, as inundações aumentam e o nível do lençol freático diminui. - O nível do lençol freático sobe. - O escoamento superficial diminui. - A poluição aumenta nos corpos hídricos, os peixes morrem, o uso recreativo e a qualidade da água diminuem.
3 - Mudança de semiurbano para totalmente urbano	

Mudança no uso do solo ou da água	Efeito no ciclo hidrológico
- Mais casas, ruas, lojas e indústrias são construídas. - Mais águas residuais são descartadas. - Mais poços são desativados. - A água é importada de outras bacias. - Os canais são estreitados ou invadidos.	- A infiltração diminui, se aumentam as inundações e enchentes e o investimento público é diminuído. - A poluição dos corpos hídricos aumenta. - O nível do lençol freático aumenta. - O escoamento superficial aumenta. - Ocorre o aumento dos danos provocados por enchentes e inundações.
- São construídos sistemas de drenagem de águas pluviais e estações de tratamento de águas residuais. - A drenagem das águas pluviais é melhorada. - Poços profundos são construídos. - Poços de recarga são construídos. - A água residual é reaproveitada.	- Os danos relacionados com enchentes e inundações “são reduzidos” e ocorre o aumento dos gastos. - Ocorre a diminuição da carga piezométrica. - Ocorre o aumento da carga piezométrica. - Os aquíferos são recuperados.

Fonte: Aranda (2010, p. 10).

Em bacias hidrográficas urbanizadas, o tempo de concentração (T_c) é reduzido, principalmente quando há construção de condutos e canais que aceleram o escoamento. Existe uma relação inversa entre o T_c e as áreas impermeáveis, conforme explicado por Tucci (2007).

As superfícies impermeáveis também afetam variáveis climáticas, como a radiação solar, temperatura, evapotranspiração e precipitação. A absorção de energia solar pelas superfícies impermeáveis aumenta a temperatura ambiente, criando ilhas de calor nas áreas urbanas. Esse aumento de temperatura contribui para o efeito estufa, pois aumenta a emissão de radiação térmica. Além disso, o aquecimento local gera movimentos ascendentes de ar, que podem intensificar as chuvas nas áreas urbanas. Essas chuvas intensas e de curta duração são críticas e podem agravar as enchentes urbanas, conforme observado por Tucci (2007, p. 91-93).

2.1.5. Tipos de inundações em ambiente urbano

Segundo o Governo do Estado do Paraná (2002, p. 10), as enchentes em áreas urbanas são consequência de dois processos, que ocorrem isoladamente ou de forma conjunta, conforme disposto no Quadro 4.

Quadro 4 – Tipos de enchentes em áreas urbanas

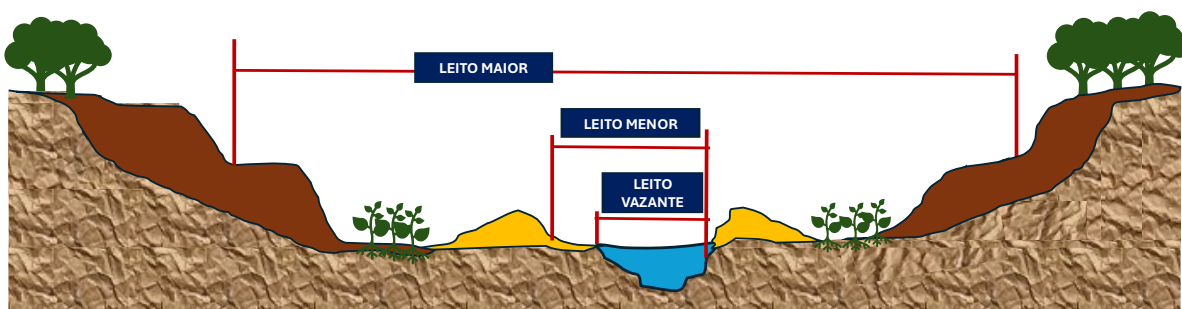
Tipo	Descrição
Enchentes em áreas ribeirinhas	Os rios geralmente possuem dois leitos: o leito menor, onde a água escoar na maioria do tempo, e o leito maior, que é inundado em média a cada 2 anos. O impacto devido à inundação ocorre quando a população ocupa o leito maior do rio, ficando sujeita a inundações.
Enchentes devido à urbanização	As enchentes aumentam em frequência e magnitude devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e redes de condutos de escoamento. O desenvolvimento urbano pode também produzir obstruções ao escoamento, como aterros e pontes, drenagens inadequadas e assoreamento.

Fonte: adaptado de Governo do Estado do Paraná (2002, p. 10) e IPH (2005, p. 4).

O Serviço Geológico Brasileiro (SGB/CPRM, 2023) destaca que a seção fluvial de um rio pode ser dividida em pelo menos três seções importantes: o leito vazante, leito menor e leito maior, essenciais para entender as variações do nível d'água.

Segundo SGB/CPRM (2023) “Quando o nível de um rio diminui em relação ao seu normal e passa a ter um volume restrito a um pequeno canal encaixado dentro do leito, dá-se o nome de Vazante, que ocorre no leito de mesmo nome”. A Figura 6 ilustra o perfil fluvial de um rio.

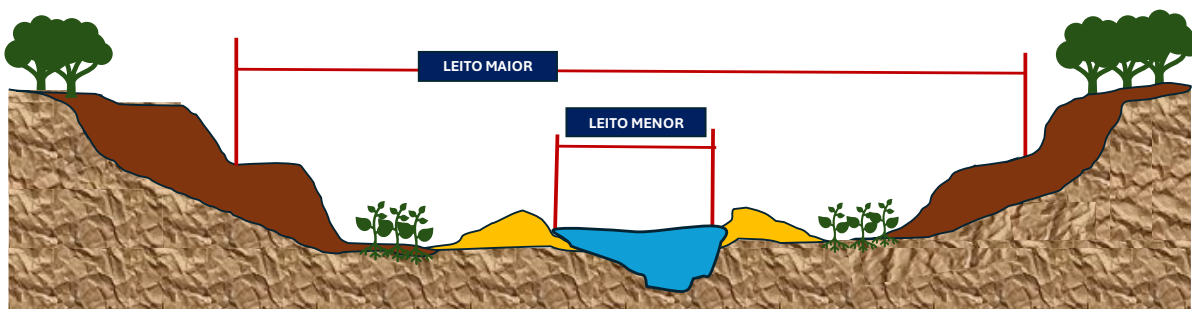
Figura 6 – Perfil fluvial de um rio



Fonte: adaptado de SGB/CPRM (2023).

Segundo o SGB/CPRM (2023), a enchente ocorre quando a variação do volume d'água está acima do nível normal devido ao aumento da vazão. O leito menor do rio é preenchido, porém, não acontece o transbordamento do canal, conforme ilustrado na Figura 7.

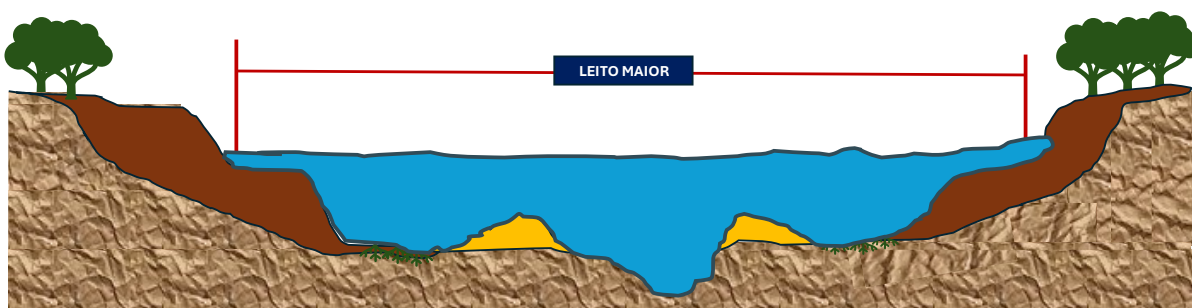
Figura 7 – Representação de uma enchente



Fonte: adaptado de SGB/CPRM (2023).

Enquanto isso, a inundação (Figura 8) ocorre quando a variação do nível d'água do rio continua a subir devido ao aumento da vazão. O leito maior do rio é preenchido, pois acontece o transbordamento do canal e as águas ocupam as áreas planas marginais, conhecidas como planície de inundação (SGB/CPRM, 2023).

Figura 8 – Representação de uma inundação



Fonte: adaptado de SGB/CPRM (2023).

As causas e consequências das inundações, conforme mencionado por Stein *et al.* (2021, p. 104), estão ligadas à ocupação antrópica das áreas favoráveis à inundação. Além disso, o surgimento das principais cidades ocorreu ao redor de cursos d'água, sendo as margens dos rios ocupadas por pessoas de baixa renda devido a falhas no planejamento urbano. Em caso de inundações, isso pode gerar prejuízos aos moradores e problemas socioambientais, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS

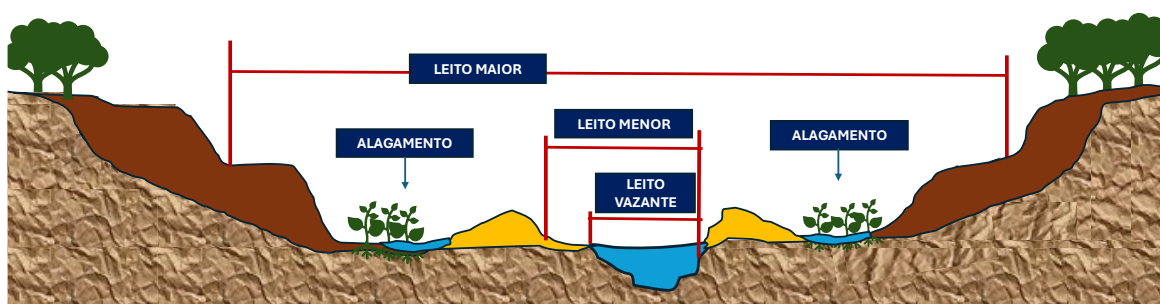


Fonte: adaptado de Notibras (2020).

“Entre as consequências da inundação, podem-se mencionar as perdas de vidas humanas, as perdas materiais (como residências, carros, mobília, entre outros), além da proliferação de doenças, como leptospirose” (Stein *et al.*, 2021, p. 104).

Os alagamentos, por sua vez, ocorrem em regiões com deficiência de drenagem, onde, devido às chuvas ou ao afloramento do lençol freático, a água fica acumulada. Essas áreas são frequentes em várzeas, nas planícies dos rios, mas também podem ocorrer longe dos rios, em zonas pontuais deprimidas (SGB/CPRM, 2023), conforme exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Representação de um alagamento



Fonte: adaptado de SGB/CPRM (2023).

Os alagamentos urbanos (Figura 11), são comuns em zonas impermeabilizadas e estão relacionados a problemas de drenagem urbana como: o mal dimensionamento

da rede de drenagem pluvial, que não consegue escoar uma vazão superior àquela para a qual foi projetada e dimensionada. Além disso, no contexto urbano, surgem outros problemas, como o entupimento da rede de drenagem devido ao acúmulo de resíduos e sedimentos (SGB/CPRM, 2023).

Figura 11 – Representação de um alagamento urbano, no bairro do Varadouro, próximo à estação ferroviária no município de João Pessoa – PB



Fonte: G1 e Paparazzo (2015).

Outro processo hídrico que ocorre é a enxurrada, definida pelo SGB/CPRM (2023) como o “escoamento superficial concentrado com alta energia de transporte, resultante de eventos chuvosos intensos ou extremos”, sendo geralmente associadas a eventos nos quais não há tempo hábil para medidas protetivas, normalmente ocorrem em drenagens confinadas e em relevos com encostas de alta declividade.

2.1.6. Casos recentes

Entre 17 e 19 de junho de 2010, fortes chuvas atingiram 67 municípios em Pernambuco, resultando na pior temporada chuvosa da década até aquele momento. Esse evento, conhecido como Onda Leste, resultou em 180 mm de chuva em 24 horas, cerca de 70% do volume esperado para junho (Banco Mundial, 2012).

As inundações de 2010 não foram um evento isolado. Sistemas atmosféricos como *La Niña* e a Zona de Convergência Intertropical causaram eventos extremos de precipitação na região do Recife, capital do estado de Pernambuco. Em 2022, as chuvas que ocorreram de 28 a 31 de maio afetaram principalmente Recife, Jaboatão

dos Guararapes, Camaragibe e Olinda. A precipitação total foi de 551 mm, 140 mm acima da média de maio, com os dias 25 e 28 sendo os mais intensos. O evento também atingiu os estados de Alagoas e Paraíba, ocasionando a morte de 130 pessoas, sendo 122 no Grande Recife (Cemaden, 2023). Essa tragédia até então está sendo considerada o maior desastre do século 21 em Pernambuco.

Segundo o Cemaden (2023), o Brasil tem cerca de 3.000 km² de áreas vulneráveis a risco de desastres climáticos. Essas áreas foram recentemente determinadas como de alto e muito alto risco de movimento de massa, inundações e inundações repentinas.

O S2iD desenvolveu o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, que fornece dados importantes sobre a ocorrência de desastres relacionados a fenômenos naturais no Brasil. Segundo o S2iD (2024), o Brasil registrou 6.183 desastres oficiais causados por inundações no período de 1991 a 2023. Além disso, ocorreram 1.873 alagamentos, 9.599 enxurradas e 6.718 eventos de chuvas intensas. A Tabela 1 contém a quantidade de pessoas afetadas por esses eventos.

Tabela 1 - Quantidade de registros oficiais de desastres causados por eventos hidrológicos entre 1991-2023

Descrição	Nº de ocorrências	Nº de óbitos	Nº de Desabrigados e Desalojados	Total de Afetados
Inundações	6.183	644	3.880.419	21.889.036
Alagamentos	1.873	128	479.661	3.890.062
Enxurradas	9.599	1.877	2.291.180	27.278.127
Movimento de massa	1.562	629	234.426	4.443.339
Chuvas Intensas	6.718	1.008	1.862.427	35.430.765
Total	25.935	4.286	8.748.113	92.931.329

Fonte: adaptado de S2iD (2024).

No dia 11 de janeiro de 2011, a região serrana do Rio de Janeiro foi atingida por um evento hidrológico extremo, caracterizado principalmente por uma enxurrada, que, na época, foi considerada a maior tragédia climática da história do Brasil. Esse evento deixou mais de 900 mortos e quase 100 desaparecidos (g1, 2022).

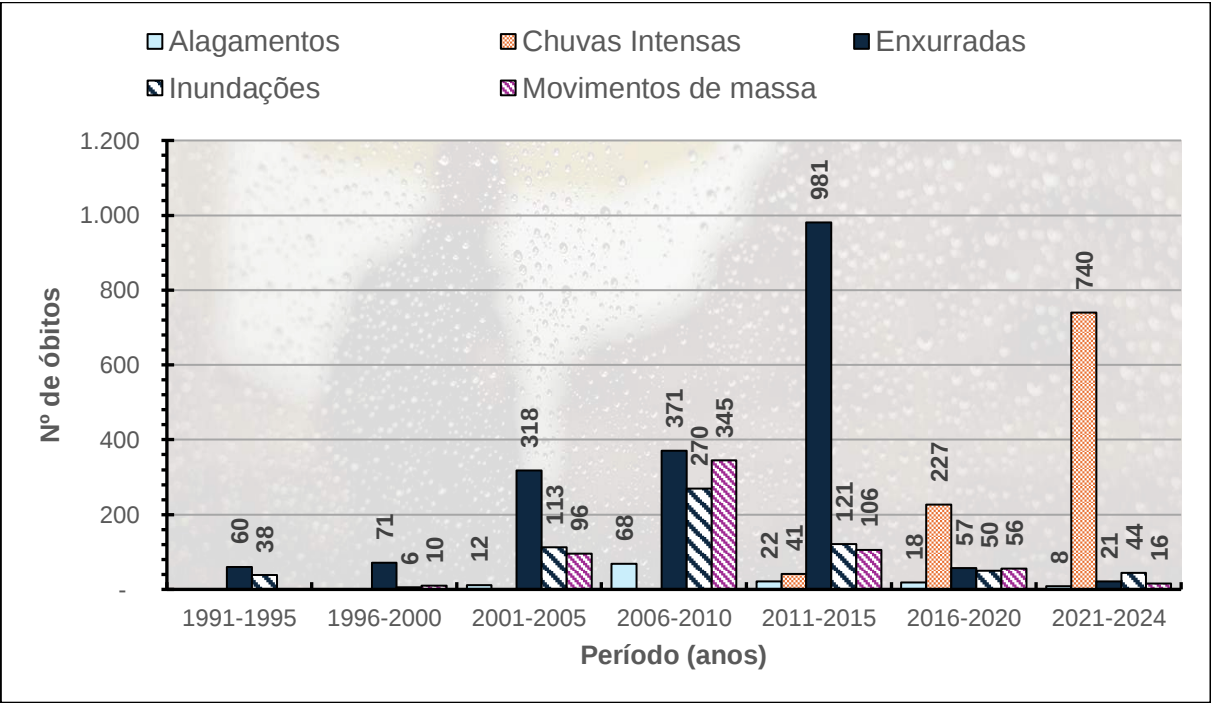
Nos anos seguintes, a vulnerabilidade do país a desastres relacionados a fenômenos naturais foi evidenciada por outros eventos expressivos, como as

inundações no Rio Grande do Sul em 2023 e 2024. Em 2023, as enchentes afetaram 106 municípios, resultaram em 49 mortes, 10 desaparecidos, 21.095 desalojados, 359.893 afetados e 943 feridos (Rio Grande do Sul, 2023). Em 2024, o evento foi ainda mais catastrófico, afetando 463 dos 497 municípios do estado, com 2.336.136 pessoas afetadas, 581.633 desalojadas, 76.955 encaminhadas para abrigos, 806 feridas e 157 mortes (Defesa Civil do Rio Grande do Sul, 2024).

Além desses eventos, outros desastres, como os rompimentos das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), também causaram inundações de grandes áreas, mortes e diversos problemas ambientais, embora não estejam diretamente ligados a chuvas intensas (BRASIL, 2024a; g1, 2024).

O Gráfico 3 exibe a quantidade de óbitos registrados devido a eventos hidrológicos entre 1991-2023 no Brasil, segundo o S2iD (2024).

Gráfico 3 - Quantidade de óbitos anuais devido aos eventos hidrológicos no Brasil entre 1991-2023, em intervalos de 5 anos.



Fonte: adaptado de S2iD (2024).

Eventos de grande magnitude, como os que ocorreram desde 1991, não apenas resultaram em perdas humanas, mas também causaram danos expressivos e prejuízos financeiros. De acordo com os registros do S2iD (2024), os eventos hidrológicos resultaram em mais de 150 bilhões de reais em prejuízos e,

aproximadamente, 119 bilhões de reais em danos. Entre esses, os eventos de inundação e enxurradas apresentaram o maior potencial de destruição. Eles foram seguidos por chuvas intensas e movimentos de massa úmida. Os alagamentos, embora também as vezes devastadores, foram os que causaram menos danos financeiros em comparação com os outros eventos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Danos e custos causados por eventos hidrológicos entre 1991-2023

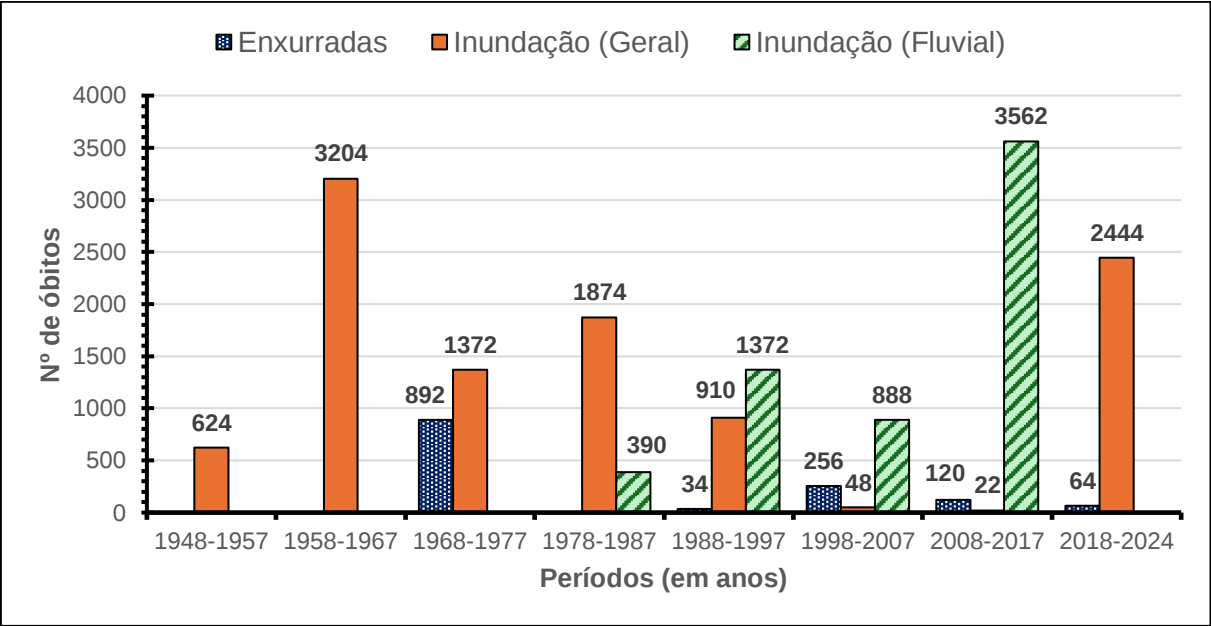
Descrição	Danos Totais (R\$)		Prejuízos (R\$)	
Inundações	R\$	25.340.866.775	R\$	45.245.084.159,82
Alagamentos	R\$	5.455.030.123	R\$	3.701.801.599,06
Enxurradas	R\$	46.354.079.233	R\$	35.944.752.790,00
Movimento de massa	R\$	14.384.517.367	R\$	6.723.116.324,95
Chuvas Intensas	R\$	28.465.030.349	R\$	58.569.290.522,25
Total	R\$	119.999.523.846,99	R\$	150.184.045.396,08

Fonte: adaptado de S2iD (2024).

Ao examinar a ocorrência de desastres relacionados com fenômenos naturais no Brasil, os hidrológicos se destacam. Utilizando informações do banco de dados *The International Disaster Database* (EM-DAT, 2024), que registra eventos com base em três critérios: ter pelo menos 10 mortes (incluindo desaparecidos), ter pelo menos 100 pessoas afetadas, feridas ou desalojadas, ou possuir um pedido de assistência internacional ou uma declaração de estado de emergência. Segundo o EM-DAT (2024) esses criterios garantem que apenas eventos expressivos sejam registrados no banco de dados.

Os dados foram processados e analisados de maneira que apenas eventos hidrológicos como “*flash flood*” (enxurradas), “*flood (general)*” (inundação geral) e “*fluvial flood*” (inundação fluvial) fossem considerados. Esses eventos foram estudados no período de 1948 a 2024 (até o mês de maio). O Gráfico 4 resultante dessa análise exibe o número de óbitos registrados por esses desastres, conforme documentado no banco de dados do EM-DAT (2024).

Gráfico 4 – Mortes relacionadas com inundações e enxurradas no Brasil, em intervalos de 10 anos, a partir de 1948



Fonte: adaptado de EM-DAT (2024).

Os dados do EM-DAT (2024) confirmam que, desde 1958, o Brasil tem sofrido cada vez mais com o aumento do número de pessoas afetadas por inundações, uma tendência que persiste até hoje, 2024, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Quantitativo de pessoas afetadas por inundações no Brasil, em intervalos de 10 anos, a partir de 1948

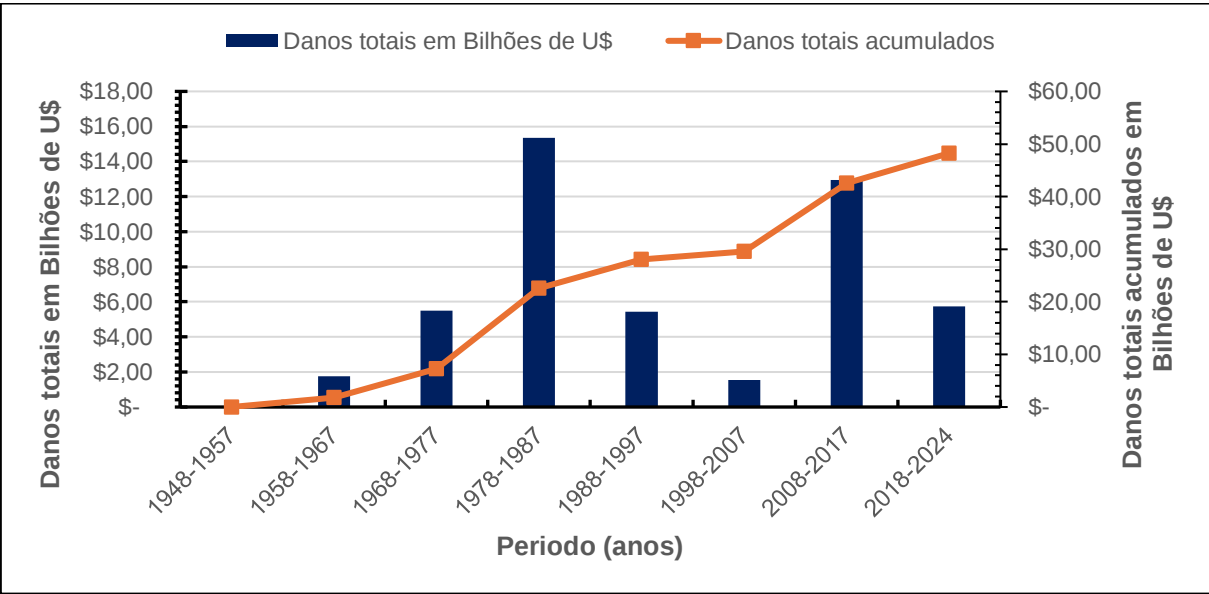
Período	Enxurradas	Inundação (Fluvial)	Inundação (Geral)	Total Geral
1948-1957			-	-
1958-1967			700.217	700.217
1968-1977	17.700		1.269.371	1.287.071
1978-1987		609.000	5.527.335	6.136.335
1988-1997	2.000	3.913.523	-	3.915.523
1998-2007	204.750	186.272	41.000	432.022
2008-2017	50.600	6.141.088	334.640	6.526.328
2018-2024	95.190		4.388.438	4.483.628
Total Geral	370.240	10.849.883	12.261.001	23.481.124

Fonte: adaptado de EM-DAT (2024).

Com base na análise dos dados do EM-DAT (2024), que abrange o período de 1946 a 2024, é evidente que os danos causados por inundações e enxurradas são altos. A magnitude dos eventos mais recentes registrados coincide com o aumento contínuo da urbanização no Brasil. O Gráfico 5 ilustra o custo total de danos,

expressos em bilhões de dólares americanos (US\$), reforçando a gravidade desses fenômenos.

Gráfico 5 – Danos totais em bilhões de dólares (US\$), relacionados a desastres hidrológicos de inundação e enxurrada de 1948-2024¹



Fonte: adaptado de EM-DAT (2024).

Durante o período de 76 anos de dados do EM-DAT, foram registradas, aproximadamente, 18.076 mortes causadas por desastres relacionados a fenômenos naturais. Destas, 1.366 foram relacionadas com enxurradas, 10.498 com inundações gerais e 6.212 com inundações fluviais. Além disso, cerca de 23.481.124 (23 milhões) de pessoas foram afetadas, resultando em um prejuízo acumulado superior a US\$ 48 bilhões, todos relacionados com as inundações.

2.1.7. Tendência de soluções

Para autores como Miguez (2017), a maioria das cidades dos países em desenvolvimento, como o Brasil, ainda não está preparada para absorver o rápido processo de urbanização que ocorreu após a Revolução Industrial.

No Brasil, o conceito de “cidades inteligentes” vem sendo utilizado. O Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), atual Ministério das Cidades (MCidades), explica que *smart cities* (cidades inteligentes) surgiu há cerca de vinte anos, quando

¹ Os dados do ano de 2024, correspondem apenas até o mês de maio.

o setor de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) começou a ver as cidades como um grande mercado potencial. Com o tempo, o termo evoluiu e ganhou diferentes conotações, como “cidades sustentáveis”, “inteligentes e humanas”, “inteligentes e sustentáveis”, entre outras (MDR, 2021).

CIDADES INTELIGENTES São cidades comprometidas com o desenvolvimento urbano e transformação digital sustentáveis, em seus aspectos econômico, ambiental e sociocultural, que atuam de forma planejada, inovadora, inclusiva e em rede, promovem o letramento digital, a governança e a gestão colaborativas e utilizam tecnologias para solucionar problemas concretos, criar oportunidades, oferecer serviços com eficiência, reduzir desigualdades, aumentar a resiliência e melhorar a qualidade de vida de todas as pessoas, garantindo o uso seguro e responsável de dados e das tecnologias da informação e comunicação (MDR, 2021, p. 28).

Nos últimos anos, esse conceito tem sido amplamente debatido. Autores como Bagaeen e Lehmann (2013) já apontavam para a complexidade e múltiplas interpretações associadas ao termo. Javidroozi *et al.* (2023) destacam que o conceito de “cidades sustentáveis, verdes e inteligentes” continua a evoluir, com discussões sobre a integração de tecnologias e sustentabilidade urbana para enfrentar os desafios de urbanização e mudanças climáticas. O planejamento urbano, segundo o Instituto Cidades Sustentáveis (2024), enfrenta o desafio de integrar eficientemente a dimensão ambiental, com foco na resiliência. Isso envolve um olhar integrado para o território, conectando o rural e o urbano, sem comprometer as atividades locais e a preservação ambiental.

De acordo com Lima e Colen (2022), algumas cidades têm se destacado como exemplos de sustentabilidade urbana. Entre elas, Curitiba - PR, Paragominas - PA e João Pessoa - PB têm implementado medidas de desenvolvimento sustentável em parceria com os governos estadual e federal.

Souza e Awad (2009, p. 135) definem o conceito de cidade sustentável como uma cidade que precisa atender aos objetivos sociais, ambientais, políticos, culturais, econômicos e físicos de seus cidadãos. Segundo eles, uma cidade sustentável possui um dinamismo complexo e precisa reagir rapidamente às mudanças, funcionando em um ciclo de vida contínuo, sem desperdícios, um conceito também conhecido como “*cradle to cradle*” (berço a berço).

2.2. Soluções para contenção de cheias

Diversos autores destacam que as medidas de controle de inundações podem ser classificadas em medidas estruturais e não estruturais para contenção de cheias em bacias urbanas, conforme descrito pelo Governo do Estado do Paraná (2002, p. 14) e apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Classificação das medidas de controle de inundações

Tipo de medida	Descrição
Estruturais	São aquelas que modificam o sistema por meio da implantação de obras estruturais, ou seja, por meio de obras de engenharia. Incluem construção de barragens, diques, canalizações e reflorestamento. As medidas estruturais são implementadas para reduzir o risco de enchentes.
Não-estruturais	São ligadas a ações de “convivência” com as enchentes ou são estabelecidas diretrizes para reversão ou minimização do problema. Estas medidas envolvem o zoneamento de áreas de inundações associado ao Plano Diretor Urbano, previsão de cheia, seguro de inundação, legislações diversas, educação ambiental, entre outros.

Fonte: adaptado de Governo do Estado do Paraná (2002, p. 14).

2.2.1. Drenagem urbana

Drenagem, do francês *drainage*, refere-se, segundo Brasil (2019, p. 247), à ação de drenar ou escoar, movendo massas líquidas por canais naturais ou artificiais. Envolve serviços, infraestruturas e instalações para transporte, detenção, tratamento e disposição final das águas pluviais urbanas.

Brasil (2019, p. 247) explica que, tradicionalmente, a drenagem urbana focava em remover rapidamente as águas acumuladas, transferindo o problema para outras áreas ou para o futuro. O manejo atual das águas pluviais urbanas vai além do simples escoamento das águas dos pontos críticos. Inclui ações estruturais e de planejamento urbano, com obras de diferentes escalas e gestão eficiente, além de legislação e fiscalização para controlar os escoamentos superficiais.

Botelho (2018) ressalta que, no Brasil, ainda não existe uma norma específica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para projetos de sistemas

pluviais urbanos. No entanto, a Lei nº 14.026/2020, em seu Art. 3º-D, define os sistemas de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas como:

[..] d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes; [..] (BRASIL, 2020).

Além disso, de acordo com a referida Lei, consideram-se serviços públicos de manejo das águas pluviais urbanas aqueles constituídos por uma ou mais das seguintes atividades:

[..] I - drenagem urbana;
II - transporte de águas pluviais urbanas;
III - detenção ou retenção de águas pluviais urbanas para amortecimento de vazões de cheias;
e
IV - tratamento e disposição final de águas pluviais urbanas [..] (BRASIL, 2020).

O sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, segundo a FUNASA (2014, p. 16), pode ser classificado de acordo com suas dimensões, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas e suas dimensões



Fonte: adaptado de FUNASA (2014, p. 16)

FUNASA (2014, p. 16) define a microdrenagem, também chamada de sistemas iniciais de drenagem, como aquela que considera a coleta e afastamento das águas superficiais ou subterrâneas através de pequenas e médias galerias, habitualmente circulares com diâmetro ($\varnothing$) < 1,5 m, podendo também apresentar formatos variados como retangular. Por outro lado, a macrodrenagem é definida como aquela que inclui, as galerias de grande porte com $\varnothing$ > 1,5 m, bem como os corpos receptores constituídos por canais e rios canalizados.

2.2.1.1. Microdrenagem

Segundo Miguez, Veról e Rezende (2015, p. 222), um projeto de microdrenagem abrange o escoamento resultante das chuvas, considerando desde os telhados das edificações até as áreas das vias de circulação, parques e jardins na superfície urbana. O objetivo desse sistema é captar a água pluvial e conduzi-la com segurança e rapidez para a rede de macrodrenagem, evitando acúmulos indesejados.

Microdrenagem ou sistema de drenagem inicial, ou ainda sistema coletor de águas pluviais, é aquele composto pelos pavimentos das ruas, guias e sarjetas, bocas de lobo, poços de visita e galerias de águas pluviais, e também canais de pequenas dimensões. Esse sistema é dimensionado para o escoamento de águas pluviais cuja ocorrência tem um período de retorno entre dois e cinco anos. Quando bem projetado, minimiza consideravelmente os alagamentos na área urbana, evitando as interferências no tráfego de pedestres e de veículos, e danos às propriedades públicas e privadas (Brasil, 2019, p. 251).

Miguez, Veról e Rezende (2015) descrevem a rede de microdrenagem como um sistema de dispositivos que captam e conduzem as águas pluviais durante e após a ocorrência de chuvas.

Um sistema de microdrenagem apresenta, segundo Miguez, Veról e Rezende (2015) e Brasil (2019, p. 264), basicamente: meio-fio, sarjetas, sarjetões, bocas de lobo, condutores, caixas de ligação, galerias de águas pluviais, poços de queda para diminuição das velocidades de escoamento excessivas, e poços de visita para inspeções e verificação das condições de operação do sistema de microdrenagem.

2.2.2. Macrodrenagem

Os projetos de sistemas de macrodrenagem são ferramentas muito importantes para a melhoria ambiental dos espaços urbanos. Eles reduzem impactos como inundações, que são processos cada vez mais frequentes e devastadores.

Segundo Brasil (2019, p. 254), a macrodrenagem é formada pelos principais talvegues naturais, responsáveis pelo escoamento final das águas pluviais em áreas urbanas. Pode incluir canais naturais ou artificiais e estruturas auxiliares. O sistema de macrodrenagem visa melhorar o escoamento e reduzir problemas de erosão, assoreamento e inundações, com estruturas projetadas para cheias de 10 a 100 anos. Um bom projeto pode diminuir os custos da microdrenagem. Canais em macrodrenagem oferecem vantagens como: capacidade de suportar o aumento da vazão, uso recreativo, estética e armazenamento, mas requerem grandes áreas e têm custos de operação e manutenção. Portanto, é necessário um planejamento cuidadoso. As obras de macrodrenagem devem ser projetadas em conjunto com o sistema de drenagem urbana.

FUNASA (2014, p. 22) explica que, mesmo sem projetos específicos, a macrodrenagem existe naturalmente em fundos de vale, córregos e cursos d'água. Obras de macrodrenagem otimizam o escoamento, melhorando características hidráulicas e conduzindo as águas captadas pela microdrenagem. Geralmente, essas obras são de grande porte, removendo o excesso de água de áreas extensas ou microbacias hidrográficas.

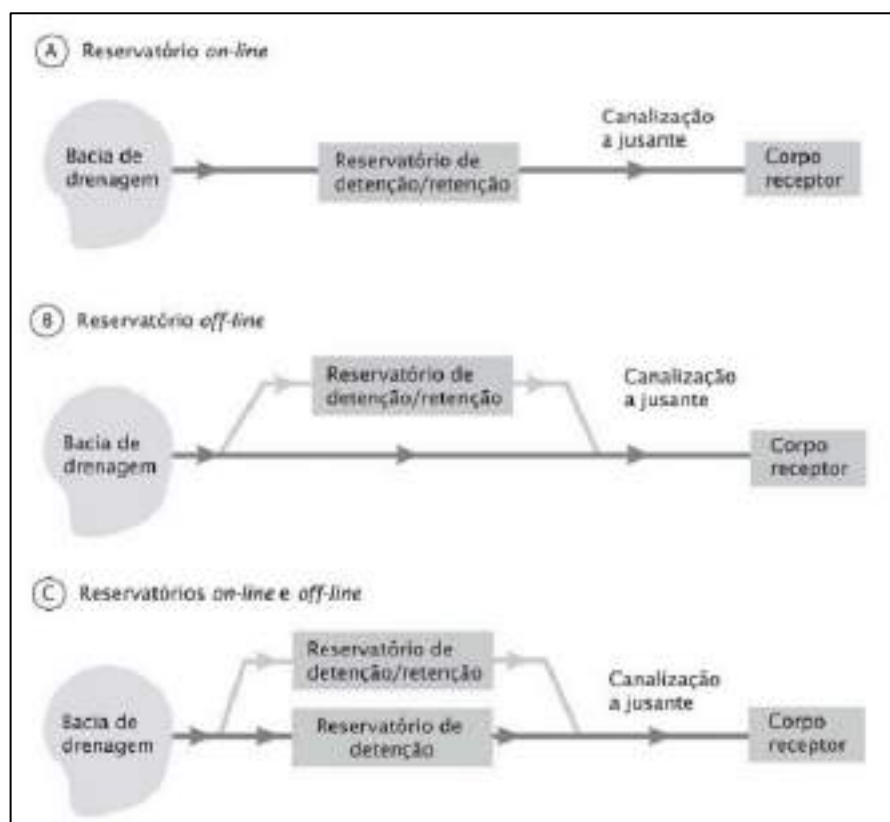
A ausência de macrodrenagem adequada causa enchentes, empoçamentos, inundações, assoreamentos e erosões. Em terrenos planos ou com dispositivos obstruídos, grandes precipitações podem causar enchentes. Problemas também surgem por subdimensionamento dos dispositivos ou uso inadequado de equações para chuvas intensas e períodos de retorno, conforme descrito por FUNASA (2014, p. 22).

2.2.2.1. Reservatórios (bacias) de retenção

De acordo com FUNASA (2014, p. 23), as bacias de retenção ou reservatórios de retenção (Figura 13), conhecidos como piscinões, são estruturas que podem ser

abertas ou fechadas e têm a função de regular a vazão de saída para atenuar os efeitos a jusante da vazão de entrada. Esses reservatórios podem ser classificados como “*on-line*” (em linha) ou “*off-line*” (fora de linha), também conhecidos como reservatório em paralelo.

Figura 13 – Representação de reservatórios (bacias) de detenção



Fonte: Canholi (2014 p. 73).

Os reservatórios em linha são construídos ao longo do curso fluvial e têm a função de retardar o tempo de escoamento, amortecendo as vazões de pico, com o volume de água armazenado sendo devolvido ao canal por gravidade (FUNASA, 2014, p. 23).

Enquanto isso, os reservatórios fora de linha, ou em paralelo, são construídos fora do curso do canal fluvial, normalmente em cotas mais baixas, e têm por função retirar os volumes que excedem a capacidade de escoamento do canal. Parte do volume de água armazenado é devolvido ao canal por gravidade ou por meio de bombas (FUNASA, 2014, p. 23).

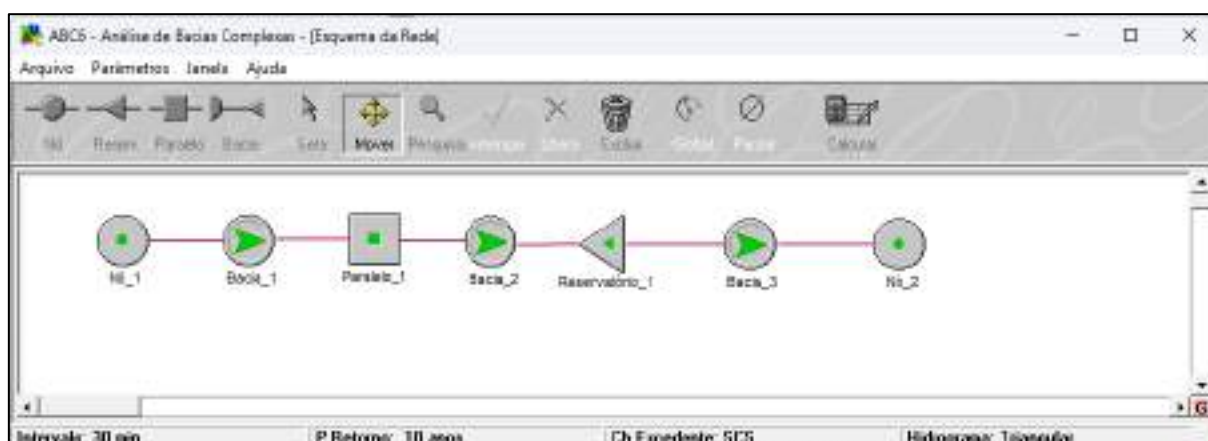
Canholi (2014, p. 72) destaca que uma verificação essencial da eficiência do sistema é assegurar que ele não aumente os picos de cheia a jusante da bacia de

detenção. Isso pode ocorrer se o *timing* (tempo) dos hidrogramas efluentes (vazão de saída) não for bem ajustado, liberando simultaneamente o volume de água armazenado e consequentemente agravando ainda mais o problema.

2.3. Modelagem computacional com uso do ABC 6

O Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheia em Bacias Complexas (SSD ABC) foi desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados à Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos (LabSid) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI USP) para fins didáticos em cursos de graduação e pós-graduação. Mas passou a ser utilizado profissionalmente devido às facilidades de utilização da sua interface gráfica e dos seus métodos de cálculo. O *software* ABC 6 versão 1.3.5² (Figura 14), é capaz de calcular hidrogramas de cheia e analisá-los em sistemas de canais e reservatórios, empregando métodos sintéticos para estimar vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas urbanas e rurais sem dados. Isso facilita o planejamento em regiões com escassez de informações e auxilia em estudos de pré-dimensionamento (LabSid, s.d).

Figura 14 – Interface do *software* ABC 6



Fonte: elaboração própria (2024).

O *software* inclui módulos para topologia, intervalos de tempo, modelos de cálculo, entrada de dados e saída de resultados funcionando basicamente em 6 módulos conforme explicam Oliveira *et al.* (1999).

² O *download* do programa pode ser realizado na página < <https://labsid.poli.usp.br/software/abc/> > mantida pelo LabSid da POLI USP.

Módulo Topologia: este módulo permite a entrada de dados relativos à estrutura do sistema em análise (ligação dos diversos elementos do sistema). Foi utilizado um formato de rede de fluxo composta de nós e arcos assim definidos:

Nós: representam pontos de início, final, confluência de bacias ou reservatórios. Quando um nó representa um reservatório, ele contém todos os dados que caracterizam esse reservatório (cota da crista do vertedor, cota de fundo do reservatório, largura do vertedor, curvas cota x vazão e cota x volume, etc.);

Arcos: representam bacias hidrográficas e trechos de canais naturais e artificiais. Para as bacias hidrográficas, cada arco contém os dados que a caracteriza e uma função de transformação responsável pela produção de uma saída (vazão) a partir de uma entrada (chuva). Já para os canais, a função de transformação é o amortecimento do hidrograma de entrada no trecho e a saída é o hidrograma amortecido no final do mesmo.

Módulo Intervalo: este módulo permite ao usuário entrar com o intervalo de tempo de discretização dos cálculos. Esse intervalo é obrigatoriamente o mesmo para todos os trechos da bacia hidrográfica.

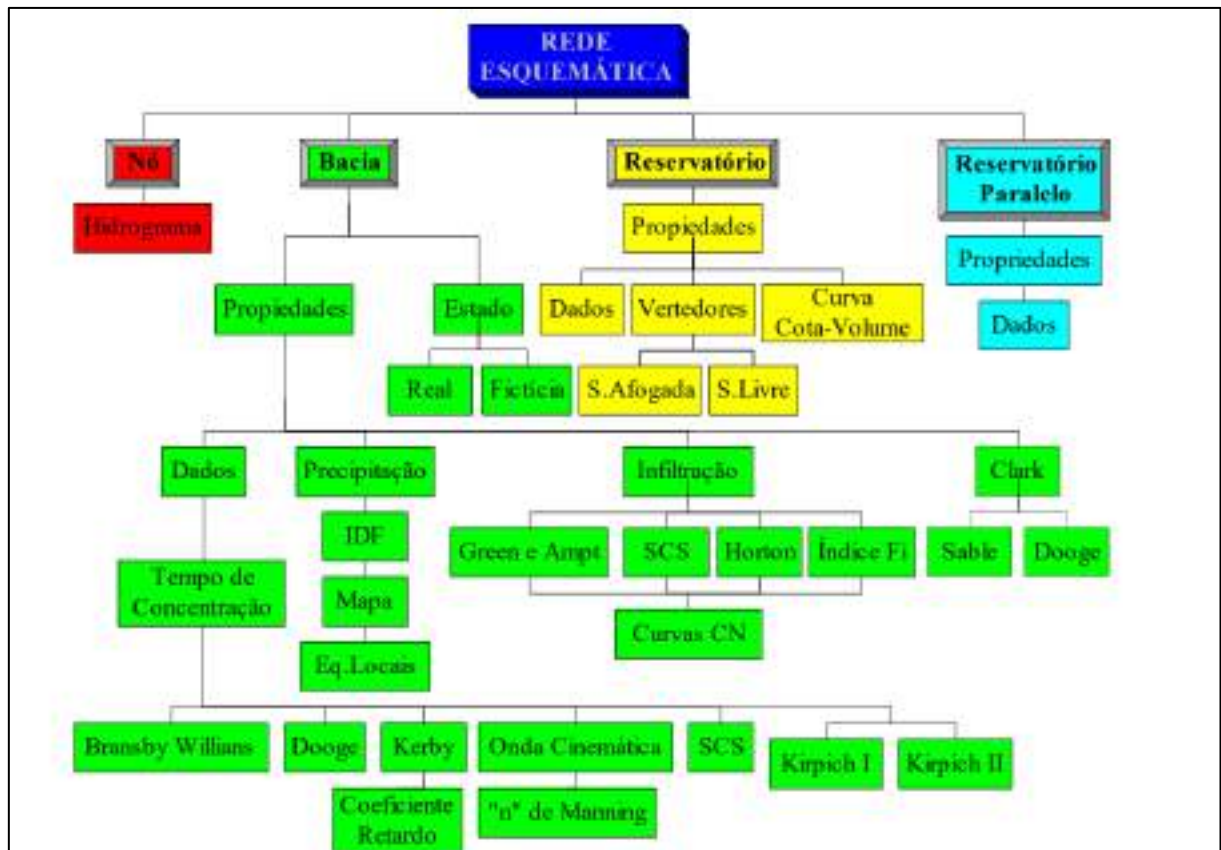
Módulo Modelos: nesse módulo é possível escolher entre quatro modelos de uso consagrado para o cálculo da chuva excedente (fórmula de Horton, fórmula de Green e Ampt, método do Soil Conservation Service e método do Índice Fi) (SCS, 1971, Seitoux, 1981). Também é possível decidir qual o modelo de traçado de hidrograma de escoamento superficial direto que será utilizado, de acordo com a preferência do usuário e as peculiaridades do problema em análise (método de Sta. Barbara, de Clark e hidrograma triangular do SCS) (Ponce, 1989, Wanielista, 1993).

Módulo Dados: esse módulo recebe informações do usuário a respeito da bacia hidrográfica tais como a área de drenagem, forma, declividade, uso do solo, características de infiltração e outras necessárias para determinar o hidrograma de cheias a partir de uma tormenta de projeto. Na tela são mostrados todos os dados relativos ao trecho (sub-bacia) que está sendo analisada. Além disso, são mostrados os modelos de cálculo de chuva excedente e de traçado do hidrograma (Oliveira et al., 1999, p. 7-8).

A análise de cheias em bacias hidrográficas complexas utilizando o SSD ABC permite o estudo de diversos cenários que auxiliam de forma expressiva a tomada de decisões. Com base nos dados inseridos, o *software* é capaz de calcular os hidrogramas, por meio de diversos modelos de chuva-vazão (Figura 15). O ABC 6 permite determinar o caminhamento das ondas de cheia pela bacia hidrográfica ao longo de trechos de canais, utilizando o método hidrológico de Muskingum para

calcular o amortecimento. Durante essa etapa, é possível inserir o comprimento do canal e o coeficiente de amortecimento, e o sistema gera três parâmetros (C_0 , C_1 , C_2) que são usados no processo. O ABC 6 também permite determinar o caminhamento das ondas de cheia em reservatórios de amortecimento, com diferentes tipos de vertedores (Oliveira *et al.*, 1999).

Figura 15 - Fluxograma com métodos e funções disponíveis no *software* ABC 6



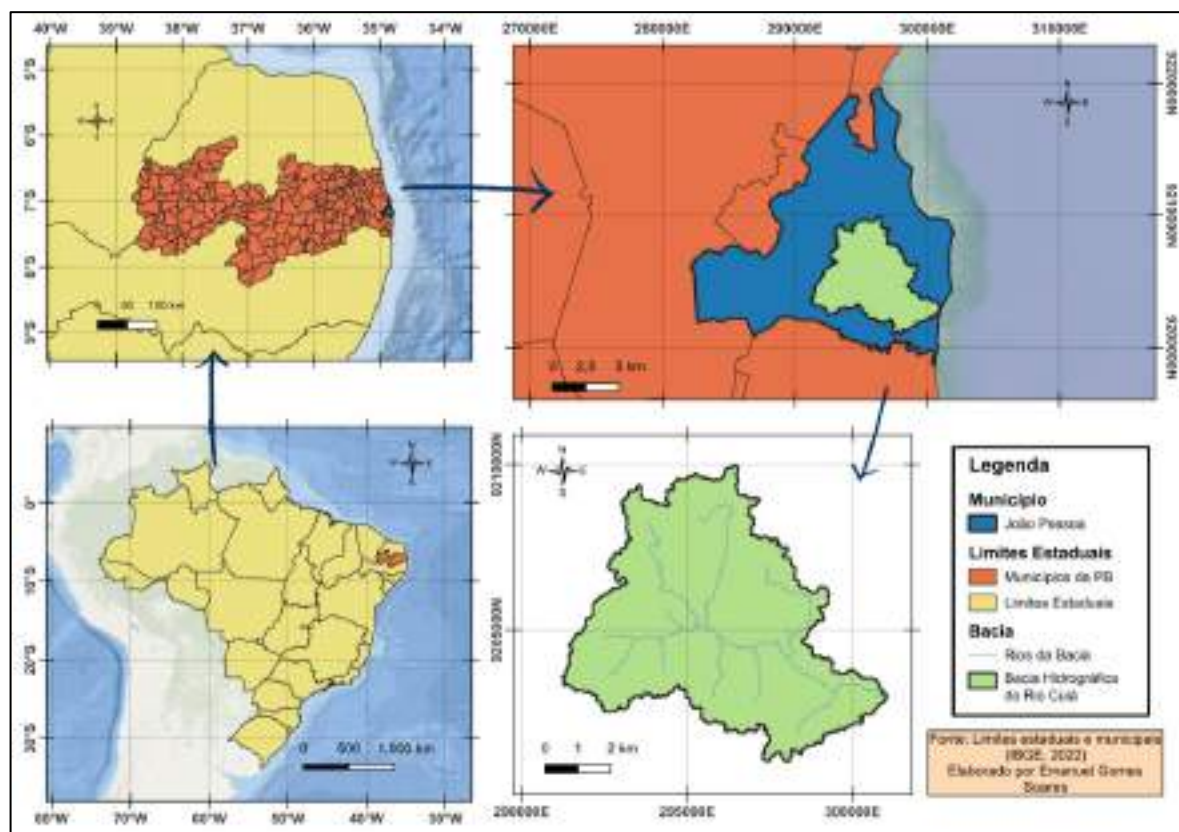
Fonte: Oliveira *et al.* (1999, p. 10).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo nesta pesquisa foi a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, localizada no Litoral Sul de João Pessoa, Paraíba (Mapa 1).

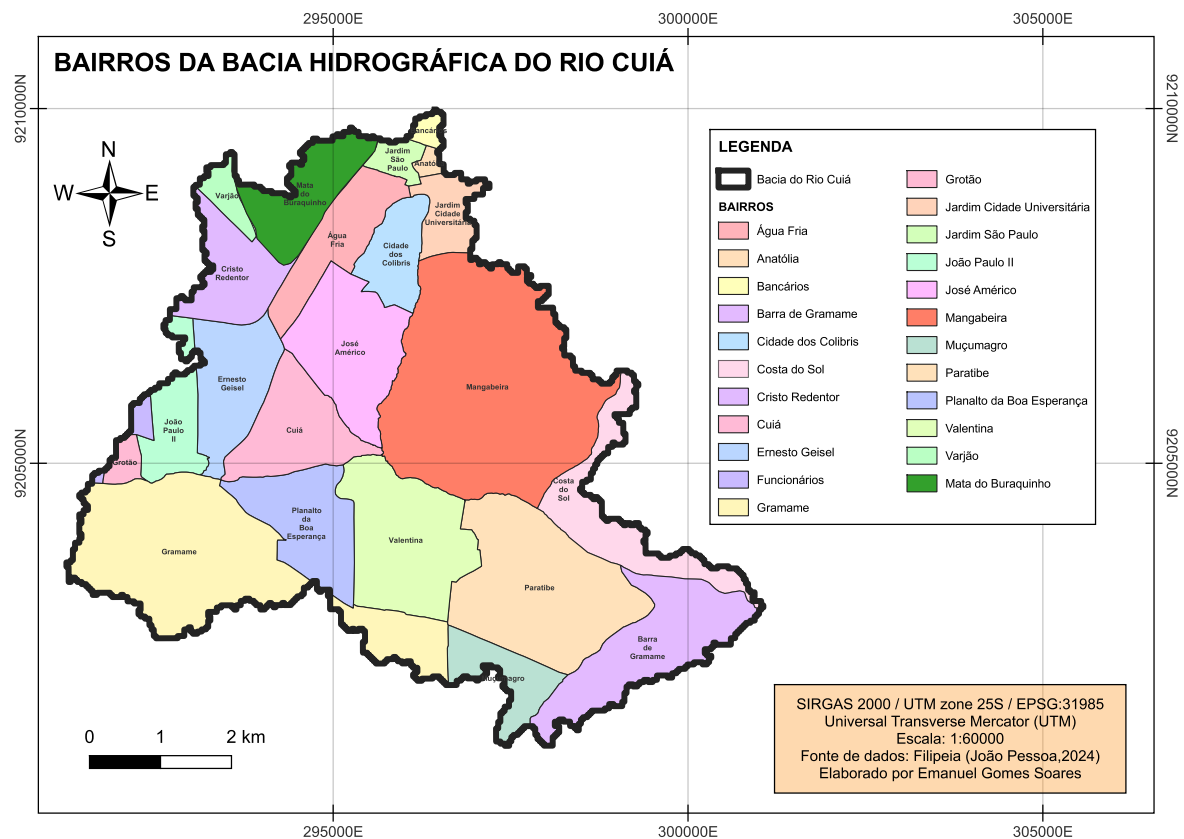
Mapa 1 – Localização da área de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá possui uma área de 45,21 km² e um perímetro de 55,44 km, com coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) zona 25S entre 9.210.000 N / 305.000 E e 9.200.000 N / 290.000 E. A região é marcada por eventos de inundação recorrentes em um dos trechos do Rio Cuiá. A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá compreende 23 bairros (Mapa 2), sendo eles: Água Fria, Anatolia, Bancários, Barra de Gramame, Cidade dos Colibris, Costa do Sol, Cristo Redentor, Cuiá, Ernesto Geisel, Funcionários, Gramame, Grotão, Jardim Cidade Universitária, Jardim São Paulo, João Paulo II, José Américo, Mangabeira, Muçumagro, Paratibe, Planalto da Boa Esperança, Valentina e Varjão.

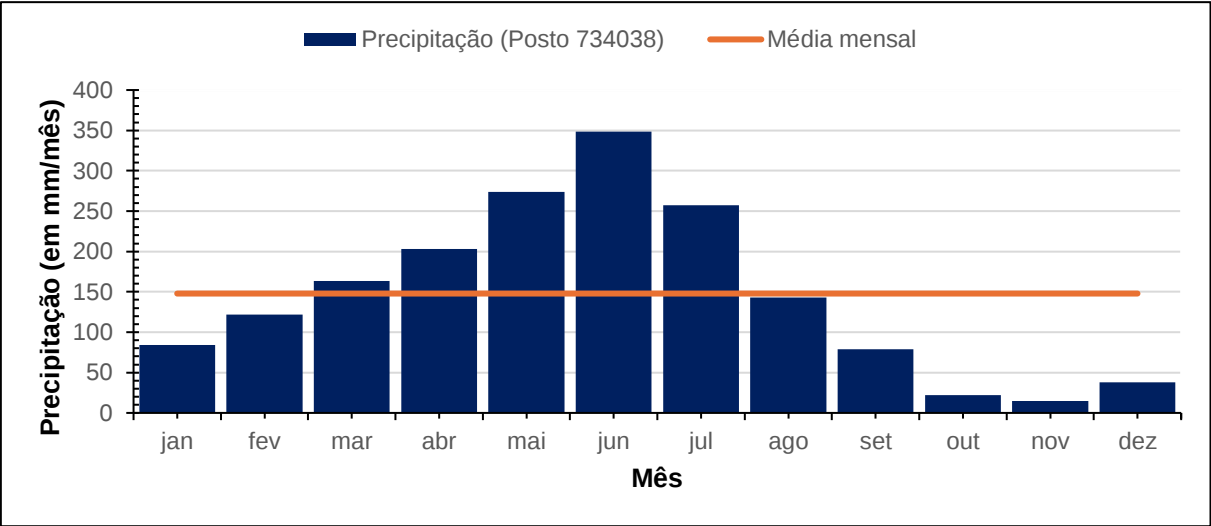
Mapa 2 – Bairros que estão inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

De acordo com os dados da estação pluviométrica 734038 - JOÃO PESSOA/MANGABEIRA, instalado nas coordenadas - 7,1972 de Latitude e -34,8131 Longitude operada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESPA) disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) por meio do *Hidroweb*, a região apresenta uma precipitação média mensal de 147 mm, considerando o período de 1998 a 2019. Os meses de maior volume de chuva são maio, junho e julho, conforme ilustrado no Gráfico 6.

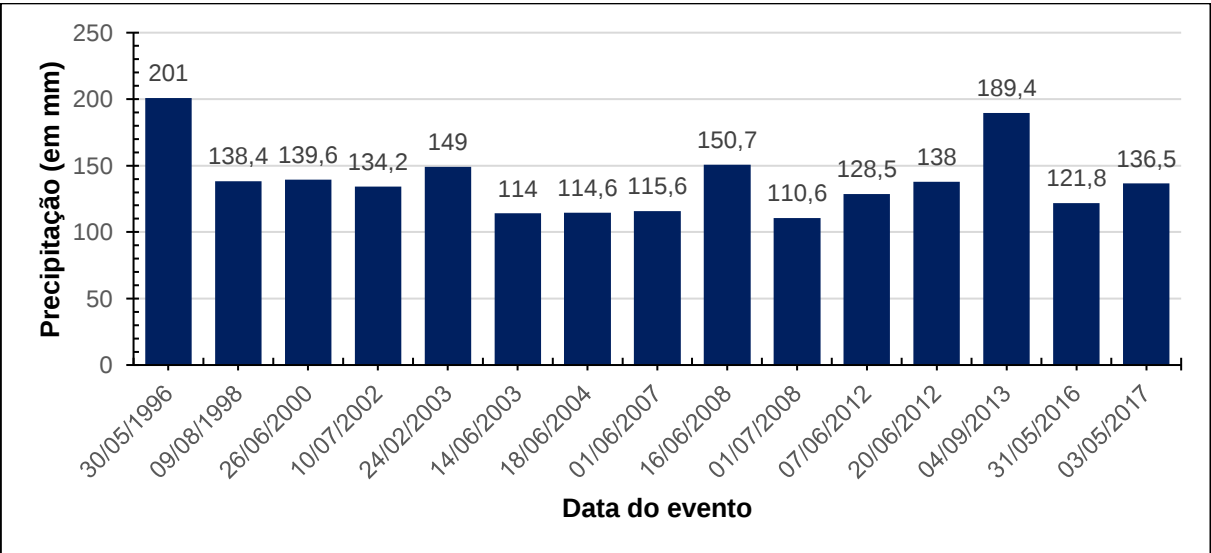
Gráfico 6 – Precipitação média mensal na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, na estação pluviométrica 734038 considerando o período de 1998 e 2019



Fonte: elaboração própria com dados de SNIRH (2024).

Além disso, ao analisar os dados diários da estação, foi possível identificar os 15 eventos mais chuvosos da região, conforme ilustrado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – 15 maiores eventos de chuva, em escala diária registrados na estação pluviométrica 734038 entre 1998 e 2019



Fonte: elaboração própria com dados de SNIRH (2024).

A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá tem sofrido alterações antrópicas, sendo a construção de loteamentos a principal atividade no contexto da urbanização. Essas mudanças afetam o tempo de concentração e, conseqüentemente, o volume do escoamento superficial ao longo do tempo. A ocupação da região começou em 1994, com uma expansão acentuada até o ano de 2021, incentivada por programas de

habitação como o Minha Casa Minha Vida, e continua a crescer, conforme o histórico apresentado por João Pessoa (2024) na Figura 16.

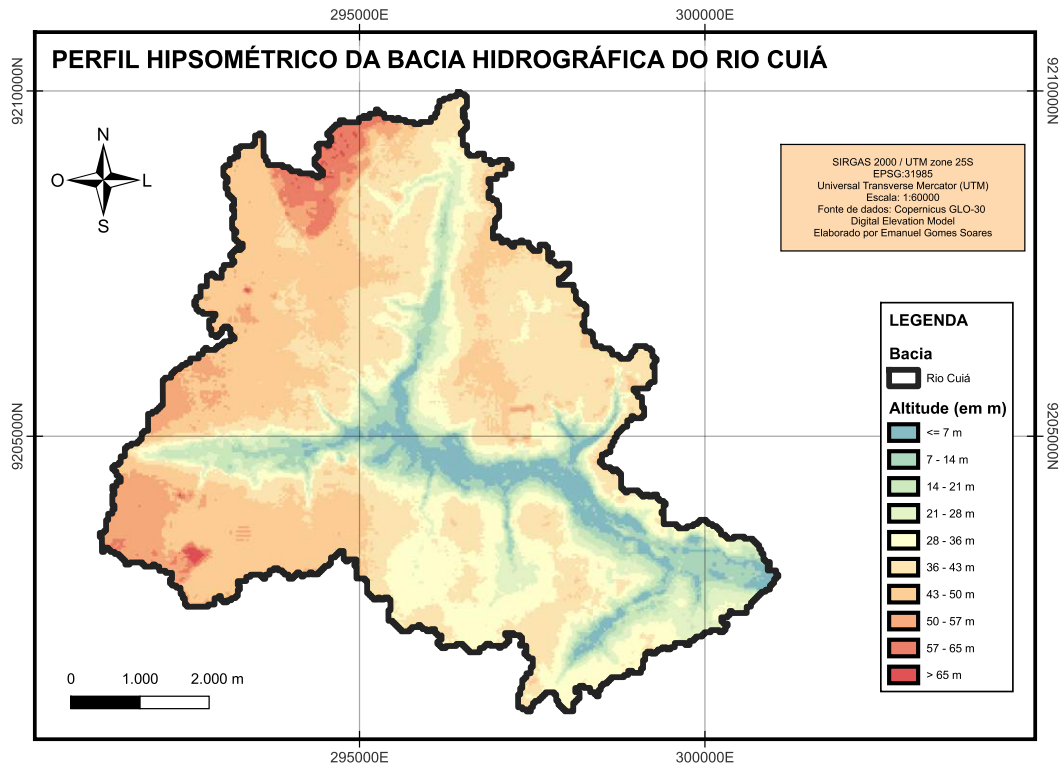
Figura 16 – Dinâmica urbana e ocupação territorial na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, conforme dados da plataforma Filipeia



Fonte: João Pessoa (2024).

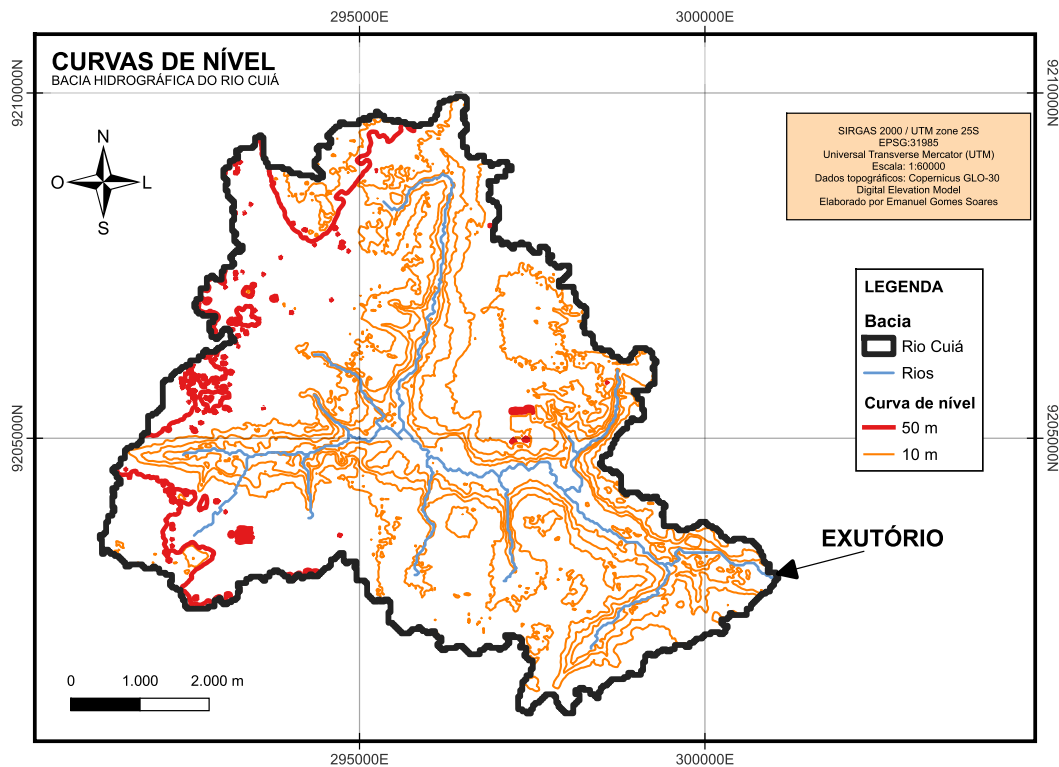
Topograficamente, a bacia hidrográfica converge para o centro, onde está o Rio Cuiá. A maior elevação é de 67,93 m no Noroeste, e a menor é de 0 m no exutório no Oceano Atlântico, conforme exposto nos Mapa 3 e 4.

Mapa 3 – Perfil Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, obtido através do MDE *Copernicus GLO-30*



Fonte: elaboração própria (2024).

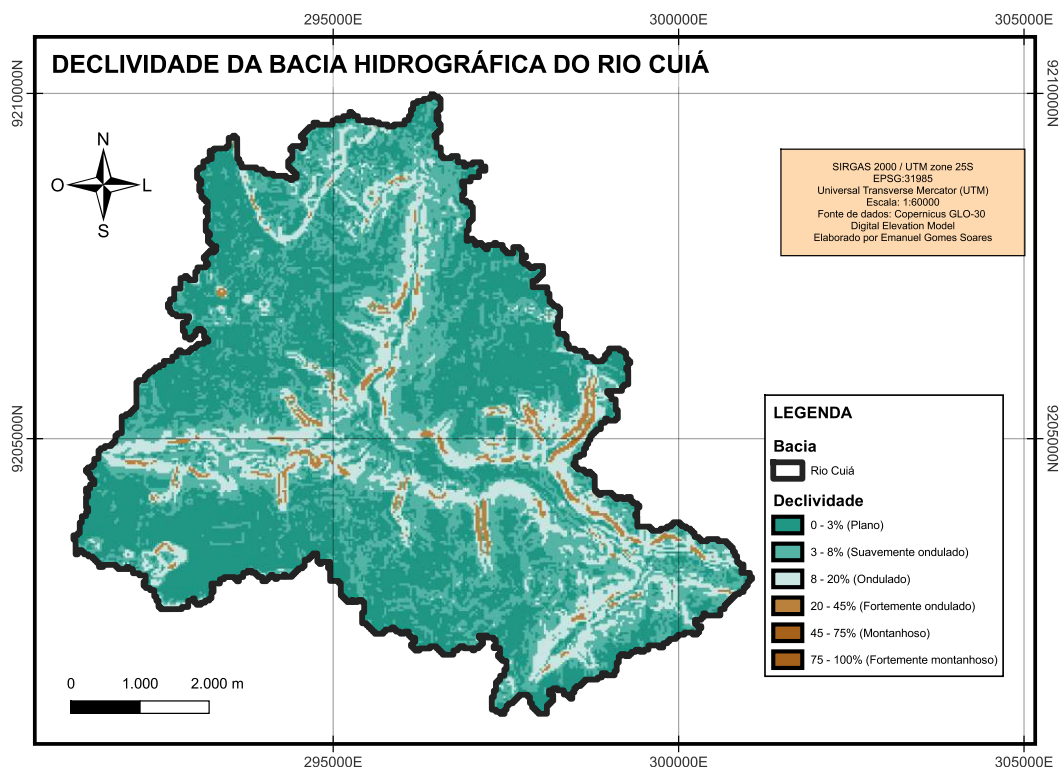
Mapa 4 – Curvas de nível obtidas através do MDE *Copernicus GLO-30* para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

A região é predominantemente plana, com maiores declividades próximo aos cursos d'água, conforme ilustrada no Mapa 5.

Mapa 5 – Declividade obtida através do MDE *Copernicus GLO-30* para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

3.2. O problema

A escolha desta área de pesquisa foi baseada na frequência de inundações após chuvas em João Pessoa, Paraíba. Um dos pontos mais afetados está na ligação entre os bairros de Mangabeira e Valentina (Figura 17). O ponto crítico é a ponte sobre o Rio Cuiá (Figura 18), nas coordenadas UTM zona 25S 9.204.487,38 N e 296.861,11 E.

Figura 17 – Ponto crítico de inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria com adaptações do Google Earth (2024).

Figura 18 – Ponte sobre o Rio Cuiá



Fonte: Portal Correio (2019).

As Figuras 19 a 21 apresentam registros de portais de notícias locais em ordem cronológica, demonstrando que esses eventos ocorrem desde, pelo menos, 2012.

Figura 19 – Inundação registrada em maio de 2012.



Fonte: g1 e Paparazzo (2012).

Figura 20 – Registro de inundação ocorrida em maio de 2022



Fonte: A UNIÃO (2022).

Figura 21 – Inundação ocorrida em 28 de maio de 2024



Fonte: TV Cabo Branco (2024).

3.3. Delimitação da Bacia Hidrográfica e discretização espacial

A Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá foi delimitada utilizando um modelo digital de elevação (MDE) fornecido pelo *plugin* OpenTopography (2024), com resolução espacial de 30 m por 30 m, especificamente o *Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model*, processado no *software* QGIS, versão 3.36.3 Maidenhead, um aplicativo profissional de Sistema de Informação Geográfica (SIG) construído com base em *Software* Livre e de Código Aberto conforme QGIS (2024).

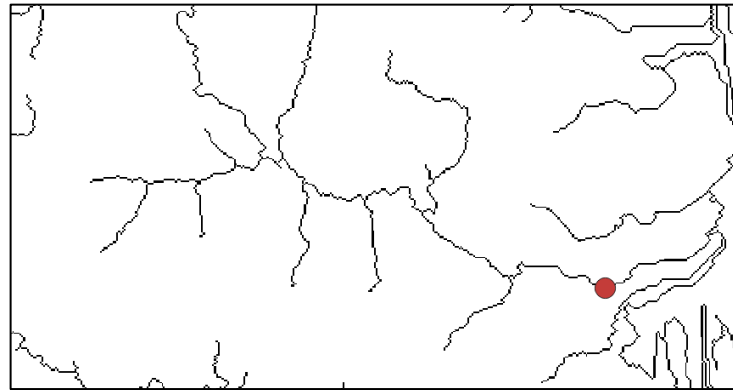
O *plugin OpenTopography DEM Downloader* foi usado para obter o MDE. Em seguida, o *Whitebox tools*³³ foi utilizado para delimitar a bacia hidrográfica em seis etapas:

1. **Remoção de depressões:** utilizando a ferramenta *BreachDepressions*.
2. **Geração de grade de fluxo:** com a ferramenta *D8Pointer*.
3. **Acumulação de fluxo:** usando a ferramenta *D8FlowAccumulation*.
4. **Extração do fluxo:** usando a ferramenta *ExtractStreams*.

³³ Disponível em < <https://www.whiteboxgeo.com/> >

5. **Conversão para vetor:** usando a ferramenta *RasterStreamToVector*.
6. Por fim, foi utilizada a ferramenta *Watershed* disponível no bloco *Hydrological analysis*, na qual foi obtida a delimitação da bacia com base no exutório demarcado no ponto na Figura 22.

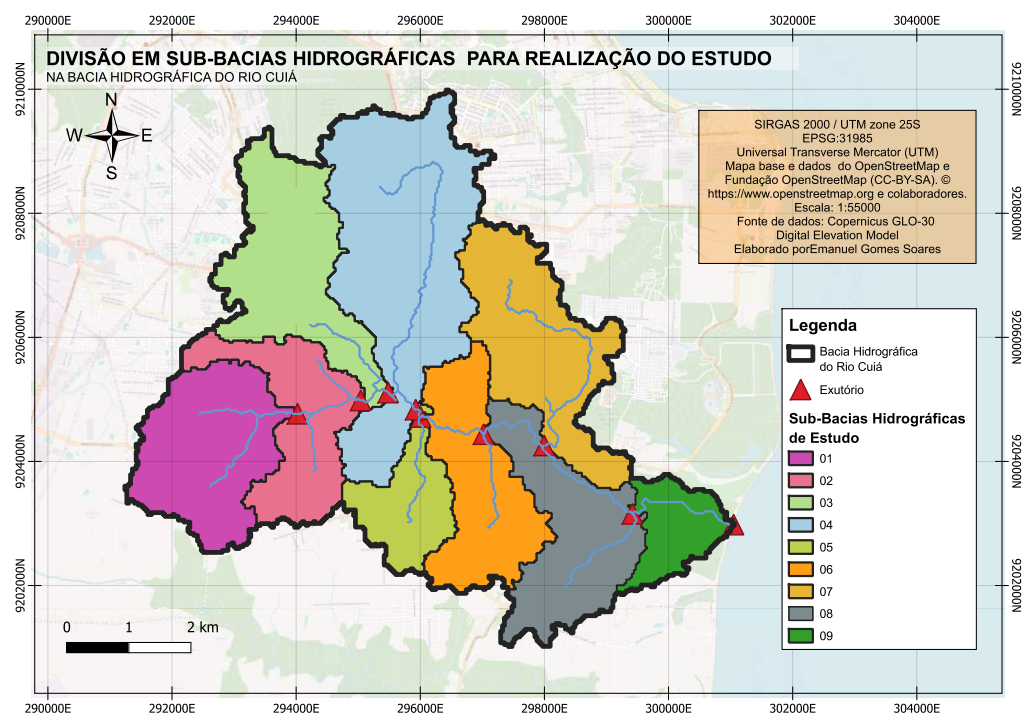
Figura 22 – Ponto de exutório (circulo) escolhido para delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Para um melhor estudo da variabilidade dos usos da bacia hidrográfica, esta foi dividida em nove sub-bacias hidrográficas (Mapa 6) utilizando a mesma metodologia empregada para delimitar a bacia hidrográfica principal.

Mapa 6 – Divisão em sub-bacias hidrográficas para realização das simulações hidrológicas



Fonte: elaboração própria (2024).

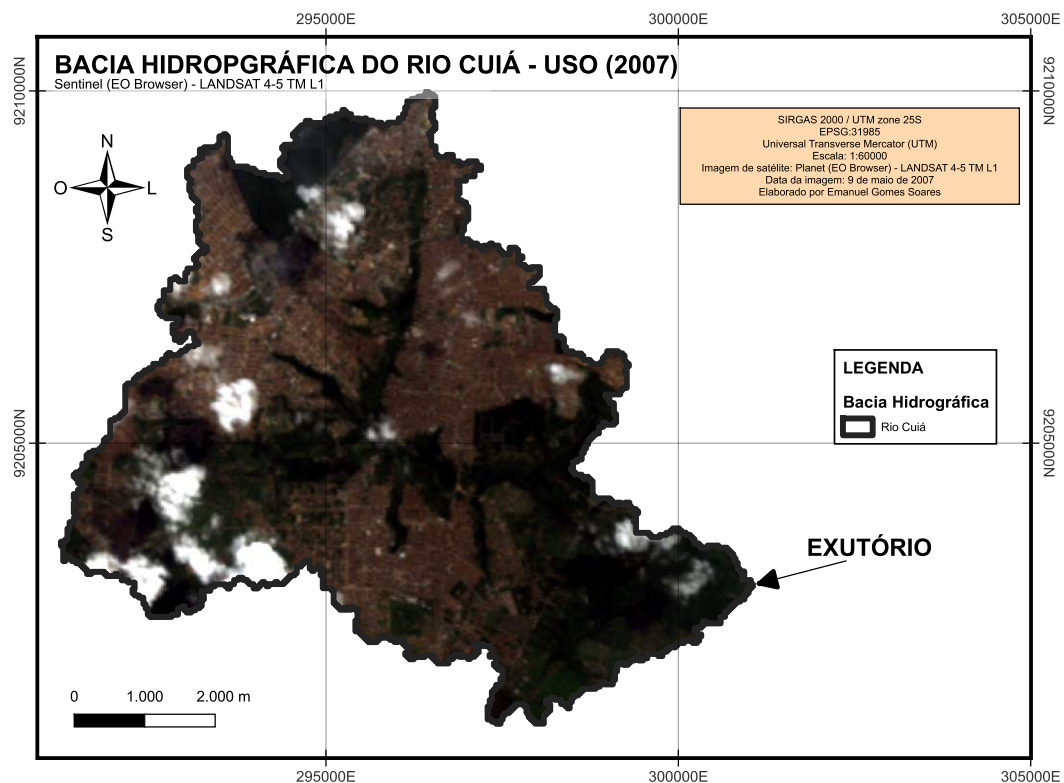
Destaca-se que, em alguns trechos, o Rio Cuiá foi “descontinuado”, como na sub-bacia hidrográfica 02 em diante na delimitação, uma vez que seriam geradas muitas microbacias hidrográficas que, de todo modo, cortariam o rio principal. Assim, optou-se por fazer essa modificação com os exutórios um pouco à frente das afluências.

3.3.1. Determinação dos cenários de estudo

Neste estudo foram considerados três cenários distintos de ocupação para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, com o intuito de representar a evolução da urbanização ao longo do tempo. Esses cenários foram construídos com base nas classificações do uso do solo em dois anos diferentes, utilizando imagens de satélite.

O Cenário I (Mapa 7) utilizou imagens do *LANDSAT 4-5 TM L-1* de 8 de maio de 2007 obtidas no *Sentinel EO Browser* (SENTINEL HUB, 2024).

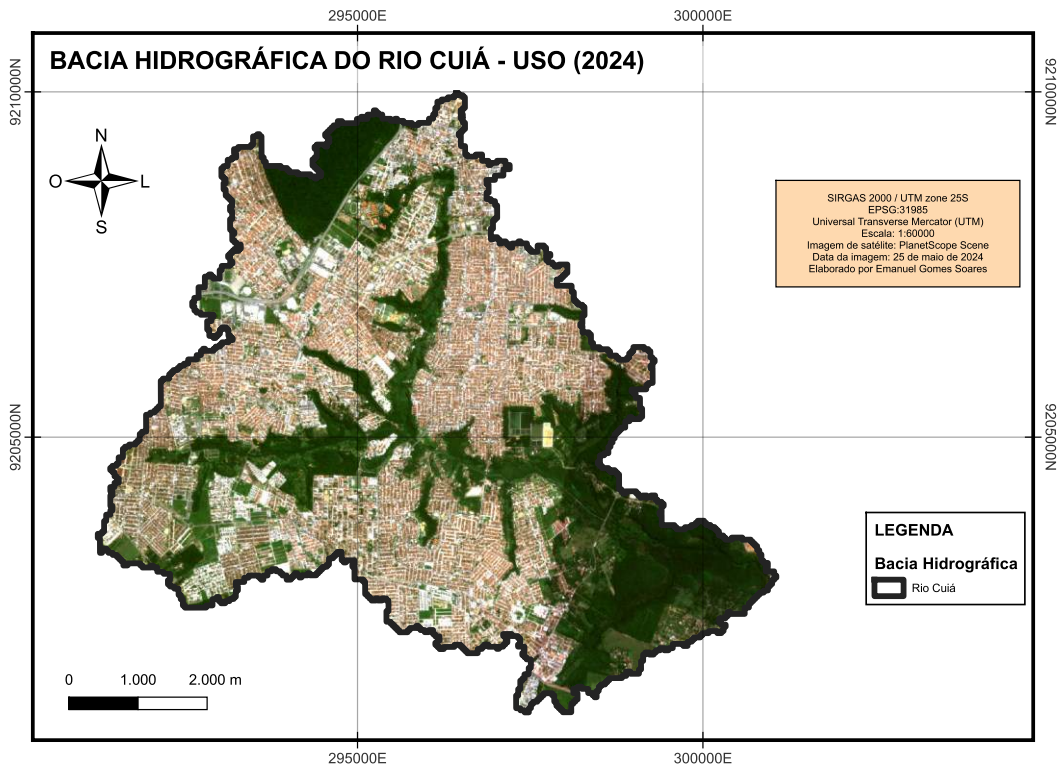
Mapa 7 – Uso do solo (em 2007) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Enquanto o Cenário II (Mapa 8) utilizou imagens do Satélite *PlanetScope Scene* (PSScene) de 25 de maio de 2024 (Planet, 2024). O Cenário III é uma modificação do Cenário II, conforme descrito no Quadro 6.

Mapa 8 – Uso do solo atual (em 2024) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Quadro 6 – Cenários utilizados na análise e proposição da solução

Cenário	Fase	Descrição
I	Passado	Consiste na ocupação da bacia hidrográfica, conforme diagnosticado no ano de 2007, a partir de levantamentos de imagens de satélite.
II	Atual	Consiste na ocupação da bacia hidrográfica, conforme diagnosticado atualmente (2024) a partir de levantamentos de imagens de satélite.
III	Futuro	Consiste na alteração pessimista da ocupação da bacia hidrográfica no Cenário II. O Cenário III simulou uma urbanização mais intensa, com grande impermeabilização do solo, onde os <i>pixels</i> correspondentes a: i. Áreas atuais do tipo Floresta Natural se tornam do tipo Formação Florestal; ii. Áreas atuais do tipo Formação Florestal se tornam do tipo Outras Formações não Florestais;

Cenário	Fase	Descrição
		iii. Áreas atuais do tipo Outras Formações se tornam do tipo Infraestrutura Urbana ; iv. Áreas atuais do tipo Pastagem se tornam do tipo Infraestrutura Urbana ; v. Áreas atuais do tipo Mangue são convertidas para áreas do tipo Pastagem ; vi. Praia e Duna, Rio Lago e Oceano permanecem inalterados.

Fonte: elaboração própria (2024).

Os Cenários II e III foram elaborados a partir do processamento de imagens de alta resolução espacial (3 m x 3 m) do satélite *PSScene* disponibilizado pelo Planet (2024), utilizando uma licença estudantil⁴ que concedeu acesso a 5.000 km² de imagens. As imagens de 25 de maio de 2024 foram renderizadas e a classificação do uso do solo foi realizada no *software* ArcGIS Pro⁵, utilizando a ferramenta Assistente de Classificação de Imagem com o método supervisionado baseado em *Pixel* por Máxima Verossimilhança. Esse processo resultou em 8 classificações, seguindo recomendações dos códigos das classes da legenda e paleta de cores utilizadas na Coleção 5 do MapBiomas (2024).

O mesmo procedimento foi aplicado para o Cenário I a única alteração foi no tamanho do *pixel* da imagem de satélite do SENTINEL HUB (2024) do ano de 2007⁶, em que cada um deles tem a resolução espacial de 21,50 m x 21,50 m, correspondendo a 462,25 m². Os valores de área de cada uso ou cobertura do solo foram obtidos com base no histograma *raster* gerado a partir da classificação supervisionada multiplicando pela área do *pixel*.

⁴ As imagens utilizadas neste estudo foram obtidas no Planet através do Satélite *PSScene*, licenciadas sob o plano "*Education and Research Standard*" (Plan ID 762593). A licença está ativa, com acesso garantido para o usuário "emanuel.gomes@academico.ufpb.br" entre as datas 06 de junho de 2024 e 06 de junho de 2026.

⁵ O ArcGIS Pro foi utilizado no modo de avaliação com o ID de assinatura 1945577982, válido até 22 de outubro de 2024

⁶ A conta do Sentinel Hub foi utilizada em conjunto com a do Planet e é válida por 6 meses, até 04 de dezembro de 2024, às 09:38.

3.3.2. Determinação do tempo de concentração (T_c)

Em estudos de drenagem, é usual a utilização de chuvas de projeto, que são eventos críticos associados a uma probabilidade de ocorrência. A duração da chuva é adotada, normalmente, como sendo maior ou igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica em questão, ou seja, ao tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua para o escoamento no seu exutório. Existem inúmeras equações para definir o tempo de concentração (T_c), segundo Miguez, Veról e Rezende (2015, p. 186).

Nesse estudo, a determinação do T_c , foi realizada com o uso da metodologia apresentada pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1986 *apud* IPH, 2005, p. D2). A estimativa do T_c pelo método cinemático, segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 29), envolve identificar N sub-trechos na drenagem principal, onde a velocidade do escoamento é constante, e somar o tempo de deslocamento da água nesses sub-trechos, conforme a Equação (1):

$$T_c = \sum_{i=1}^N \frac{1000 * L_i}{60 * v_i} \quad (1)$$

em que, T_c é o tempo de concentração em minutos, N é o número de subtrechos, L_i é o comprimento do subtrecho i (em km) e v_i é a velocidade da água ao longo do subtrecho i (em m/s).

Esse método foi desenvolvido pelo SCS e é recomendado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH, 2005, p. D1) e autores como Canholi, (2014, p. 114). Esse método foi utilizado porque propõe dividir o caminho percorrido pela água em trechos sobre a superfícies e em canais.

3.3.2.1. Cálculo do T_c em trechos de superfície (T_{si})

Essa formulação considera o coeficiente de rugosidade de Manning (n) (atrito), que varia em diferentes tipos de trecho. Para escoamentos em pequenos riachos não convergentes e superfícies irregulares, utiliza-se a equação obtida a partir da solução da onda cinemática de Manning, conforme a Equação (2):

$$T_{Si} = \frac{5,474 * (n * L_{esc})^{0,8}}{P_{24}^{0,5} * S^{0,4}} \quad (2)$$

em que, T_{Si} é o tempo de concentração do escoamento em superfície (em minutos), S é a declividade do terreno (em m/m), n é o coeficiente de rugosidade de Manning (Quadro 7), L_{esc} é o comprimento do trecho (em m) e P_{24} é a precipitação com 24 horas de duração (em mm). A P_{24} é determinada para a curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) correspondente ao local em estudo, considerando o tempo de retorno (TR) de projeto.

Quadro 7 – Valores de Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento em trechos de superfície

Descrição	Tipo de superfície	Rugosidade (n)
Superfícies alisadas	Concreto, asfalto, pedregulhos ou solo exposto	0,011
	Concreto liso/rugoso	0,012
	Pisos cerâmicos	0,015
	Pavimento intertravado / paralelepípedo	0,024
Solos sem cultivo	-	0,050
Solos cultivados	Resíduos cobrem < 20%	0,150
	Resíduos cobrem > 20%	0,240
	Gramina nativa, alfafa etc.	0,410
Pastagens naturais	Pastagens naturais / Plantações rasteiras (normais)	0,130
	Gramados (esparsos / densos)	0,15 / 0,24
Florestas	Vegetação rasteira esparsa	0,400
	Vegetação rasteira densa	0,800

Fonte: adaptado de Canholi (2014, p. 117) e SCS (1986) *apud* IPH (2005).

3.3.2.1. Cálculo do T_c em trechos de canais (T_{Pi})

Caso o escoamento esteja enquadrado e uma das seguintes situações como: a lâmina de água passa a ser maior que no escoamento em um plano, convergindo para um sistema único, formando uma espécie de canal; rios e arroios; e redes de drenagem; é necessário utilizar outra formulação para calcular o T_c , conforme explicado pelo IPH (2005, p. D3). O procedimento de cálculo nessas situações se inicia com a aplicação da Equação (3) para determinar o Raio Hidráulico (R_h):

$$R_h = A_{st}/P_m \quad (3)$$

em que, A_{st} é a área molhada da seção transversal (em m^2) e P_m é o perímetro molhado da seção transversal (em metros).

Aplicando a Equação (3) na Equação (4) é possível determinar a velocidade do escoamento:

$$V = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} * S_L^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (4)$$

em que, V é a velocidade do escoamento (m/s); S_L é a declividade longitudinal de fundo do canal (m/m) e n é o coeficiente de rugosidade de Manning (Quadro 8).

Quadro 8 – Valores de Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento em trechos de canais naturais e artificiais

Tipo	Característica	Rugosidade (n)
Canais revestidos	Canais retilíneos com grama de até 15 cm de altura	0,30 – 0,40
	Canais retilíneos com capins de até 30 cm de altura	0,30 – 0,060
Galerias de concreto	Pré-moldado com bom acabamento	0,011 – 0,014
	Moldado no local com formas metálicas simples	0,012 – 0,014
	Moldado no local com formas de madeira	0,015 – 0,020
Sarjetas	Asfalto suave	0,013
	Asfalto rugoso	0,016
	Concreto suave com pavimento de asfalto	0,014
	Concreto rugoso com pavimento de asfalto	0,015
	Pavimento de concreto	0,014 – 0,017
	Pedras	0,017
Outros tipos de canais*	Canal com paredes de concreto e fundo de enrocamento/material granular	0,018 a 0,022
	Canal retilíneo trapezoidal, de concreto e acabamento regular	
	Canal com seções retangulares, retilíneo, escavado em rocha com laterais de pedra argamassada	0,018 a 0,026
	Canal retilíneo com paredes verticais de concreto sem acabamento, fundo rochoso	0,018 a 0,024
	Canal revestido com mantas de gabião sem revestimento, e fundo de enrocamento	0,027 a 0,030
	Canal de paredes verticais de gabião, com vegetação densa e fundo de enrocamento/areia	0,028 a 0,033
	Canal escavado regular, com fundo de solo e margens com vegetação alta	0,025 a 0,033

Tipo	Característica	Rugosidade (n)
	Canal escavado retilíneo, leito menor de gabião, margens de grama com poucas árvores	0,040 a 0,055
	Canal natural, seções irregulares fundo de solo, margens com mato baixo	0,035 a 0,040
	Canal natural, com margens invadidas, fundo de material granular e mato alto; seções hidráulicas muito irregulares	0,060 a 0,080

*Valores estimados por Canholi (2014)

Fonte: adaptado de IPH (2005) e Canholi (2014, p. 155-157).

Com o resultado da Equação (4) é possível determinar o tempo de concentração por meio da Equação (5):

$$T_{P_i} = L_{\text{trecho}}/v \quad (5)$$

em que, T_{P_i} é o tempo de concentração no canal (em segundos); L_{trecho} é o comprimento do trecho de talvegue (m); e V é a velocidade do escoamento (m/s).

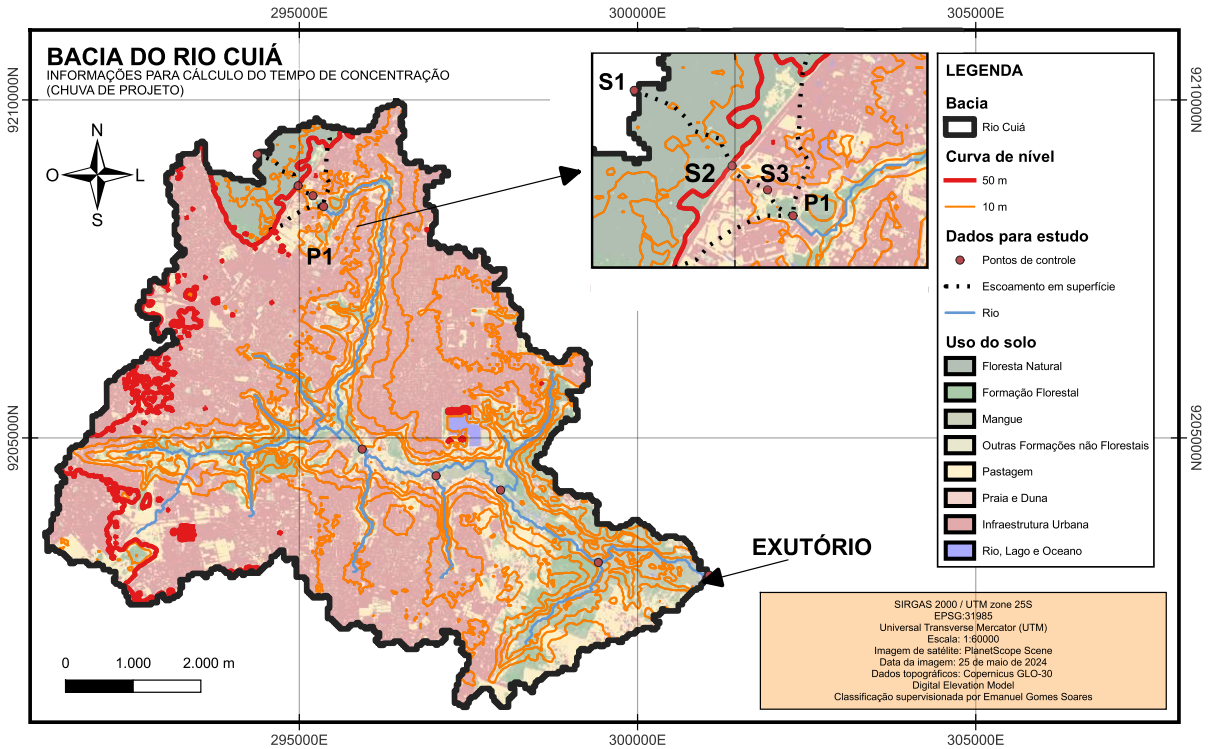
Assim o T_c é a soma dos valores de T_{s_i} , T_c e T_{P_i} para os vários segmentos de fluxo consecutivos, conforme a Equação (6):

$$T_c = \sum_{i=1}^N T_{s_i} + T_{P_i} \quad (6)$$

em que, T_c é o tempo de concentração (em minutos) e N o número de segmentos de fluxo.

Para a chuva de projeto, adotou-se como critério o tempo de concentração da bacia hidrográfica como um todo, conforme exibido no Mapa 9.

Mapa 9 – Informações utilizadas para determinação do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Assim, sendo o T_c de 404 minutos, baseado no Cenário II (atual), em que foi estudado três trechos de escoamento superficial (S1, S2 e S3) e um trecho em canal (rio), identificado como P1, que termina no exutório. O ponto S1 é o mais distante do exutório da bacia hidrográfica. Além disso foi adotado que todos os cursos d'água têm largura de 2,0 m e profundidade de 0,80 m, ou seja, uma seção retangular para simplificar os estudos. A Tabela 4 contém um resumo dos dados obtidos durante o procedimento.

Tabela 4 – Resumo dos cálculos para o tempo de concentração para determinação da chuva de projeto

Ponto de controle	Tempo (em minutos)	Valor de n	Descrição
S1	110,8	0,13	Pastagens naturais
S2	5,0	0,011	Superfícies alisadas como: Concreto, asfalto, pedregulhos ou solo exposto
S3	34,8	0,13	Pastagens naturais
P1	253,4	0,033	Canal natural, seções irregulares fundo de solo, margens com mato baixo
Total	404,0	-	-

Fonte: elaboração própria (2024).

3.3.3. Determinação do Tempo de Retorno (TR)

A primeira decisão a ser tomada na elaboração de um projeto de drenagem, seja de micro ou macrodrenagem, segundo Miguez, Veról e Rezende (2015, p. 186), é determinar o nível de segurança exigido para o sistema, relacionado ao TR da chuva que será utilizada no projeto, conforme a Equação (7):

$$TR = 1/P_{ev} \quad (7)$$

em que, TR é o tempo de retorno (em anos) e P_{ev} é a probabilidade de ocorrer um evento igual ou superior em um ano qualquer.

A escolha do TR está diretamente relacionada ao risco a ser assumido e pode ser adotado, de acordo com a região de instalação do sistema de drenagem. Miguez, Veról e Rezende (2015, p. 186) destacam que um TR maior aumenta a segurança, mas também os custos de construção. Portanto, é necessário equilibrar segurança e custo para definir o TR da chuva de projeto. Diversos autores utilizam um TR pré-definido, conforme recomendado por São Paulo (2012, p. 28) e exposto no Quadro 9.

Quadro 9 - Períodos de retorno propostos para projetos de drenagem urbana em São Paulo - SP

Características do sistema	TR (anos)
Microdrenagem	2 a 10
Macrodrenagem	25 a 50
Grandes corredores de tráfego e áreas vitais para a cidade	100
Áreas onde se localizam instalações e edificações de uso estratégico, como hospitais, bombeiros, centros de controle de emergências etc.	500
Quando há risco de perdas de vidas humanas	≥ 100

Fonte: adaptado de São Paulo (2012, p. 28).

o zoneamento de várzeas e áreas ribeirinhas, que pode ser realizado de forma progressiva através da definição de faixas, as regiões com área de inundação mais frequente, resultante de chuvas com período de retorno entre 2 e 10 anos, podem ter usos mais restritivos: parques, jardins, quadras esportivas, etc. Faixas inundáveis para recorrências maiores (períodos de retorno entre 25 e 100 anos) seriam ocupadas com usos menos restritivos: clubes, algumas instalações institucionais, habitações adaptadas ao alagamento (pilotis), etc (São Paulo, 2012, p. 28).

3.3.4. Determinação da chuva de projeto

A chuva de projeto é um evento idealizado com um TR específico. A curva IDF é obtida a partir da análise estatística de longas séries de dados pluviométricos (Collischonn e Dornelles, 2015, p. 285).

A metodologia de desenvolvimento da curva IDF baseia-se na seleção das maiores chuvas de uma duração escolhida (por exemplo 15 minutos) em cada ano da série de dados. Com base nesta série de tamanho N (número de anos) é ajustada uma distribuição de frequências que melhor represente a distribuição dos valores observados. O procedimento é repetido para diferentes durações de chuva (5 minutos; 10 minutos; 1 hora; 12 horas; 24 horas; 2 dias; 5 dias) e os resultados são resumidos na forma de um gráfico, ou equação, com a relação das três variáveis: Intensidade, Duração e Frequência de Excedência (ou período de recorrência) (Collischonn e Dornelles, 2015, p. 70).

A curva IDF pode ser representada, de forma geral, por uma expressão do tipo (Equação 8):

$$I = \frac{a * TR^b}{(t_d + c)^d} \quad (8)$$

em que, I é a intensidade da chuva ($mm * hora^{-1}$), a, b, c e d são parâmetros característicos da IDF de cada local, TR é o tempo de retorno em anos e t_d é a duração da precipitação em minutos.

As curvas IDF são aplicáveis para chuvas de 10 minutos a 24 horas, mas não para TR superiores a 100 anos. Na ausência de curvas IDF locais, é possível recorrer à análise estatística de dados de chuva coletados por pluviômetros em intervalos diários conforme explicam Collischonn e Dornelles (2015).

A curva IDF utilizada neste estudo, foi a proposta por João Pessoa (2021, p. 15), conforme a Equação (9)

$$I = \frac{823,4 * TR^{0,2153}}{(t_d + 10,9)^{0,7499}} \quad (9)$$

Esta equação foi aplicada para um TR de 50 anos, conforme recomendado por São Paulo (2012, p. 28), com a duração da chuva (t_d) determinada pelo T_c , que nesse caso foi de 404 minutos.

Collischonn e Dornelles (2015) recomendam que a discretização temporal da chuva deve ser igual ou menor a 1/10 do tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo. Como o T_c foi de 404 min, então:

$$\Delta t = 404 * 0,1 = 40,4 \text{ min} \quad (10)$$

No caso em questão, a chuva foi discretizada em intervalos de 15 minutos para uma melhor análise. Para obter a distribuição da chuva de projeto, foi utilizado o método dos blocos alternados, no qual os valores incrementais para cada duração foram reorganizados de forma que o máximo incremento ocorresse, aproximadamente, no meio da duração total da chuva. Os incrementos seguintes foram reposicionados alternadamente antes e depois do bloco de chuva mais intensa, até preencher toda a duração, conforme exposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Blocos de chuva de 15 minutos de duração cada um organizados em ordem decrescente

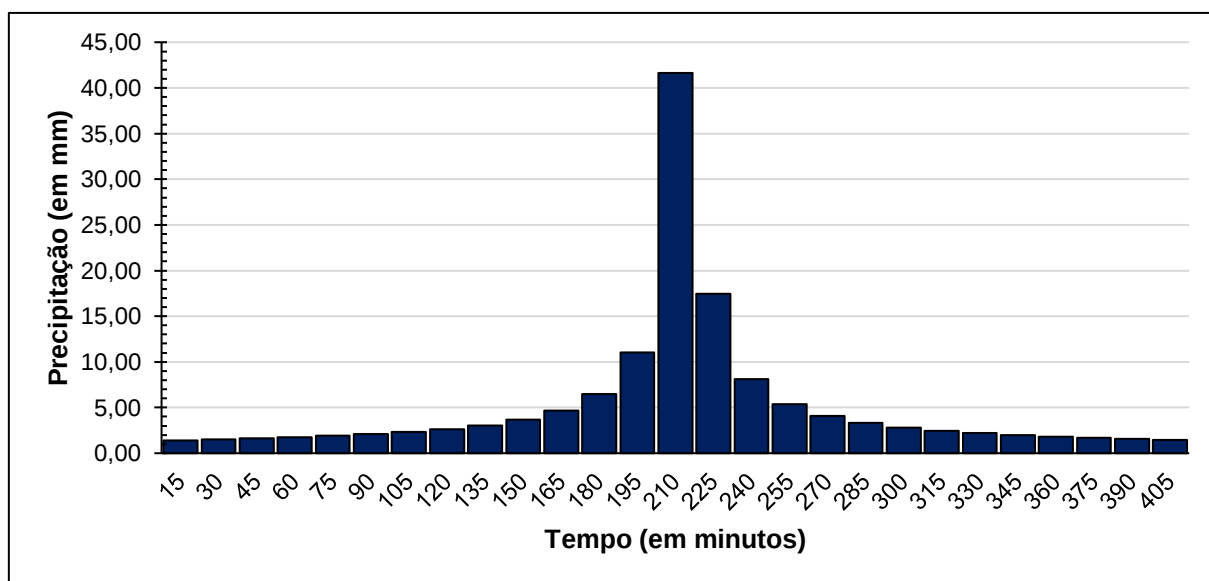
Duração (min)	I (mm/h)	P _{acumulada} (mm)	P _{incremental} (mm)	P _{ordenada} (mm)	Posição original
15	0,25	166,56	41,64	1,42	27
30	0,50	118,24	17,48	1,51	25
45	0,75	93,54	11,04	1,62	23
60	1,00	78,27	8,11	1,75	21
75	1,25	67,78	6,45	1,90	19
90	1,50	60,07	5,39	2,09	17
105	1,75	54,14	4,64	2,33	15
120	2,00	49,42	4,09	2,64	13
135	2,25	45,56	3,67	3,06	11
150	2,50	42,34	3,33	3,67	9
165	2,75	39,60	3,06	4,64	7
180	3,00	37,24	2,83	6,45	5
195	3,25	35,19	2,64	11,04	3
210	3,50	33,38	2,47	41,64	1
225	3,75	31,78	2,33	17,48	2
240	4,00	30,34	2,20	8,11	4
255	4,25	29,05	2,09	5,39	6
270	4,50	27,88	1,99	4,09	8
285	4,75	26,81	1,90	3,33	10
300	5,00	25,83	1,82	2,83	12
315	5,25	24,94	1,75	2,47	14

Duração (min)	I (mm/h)	P _{acumulada} (mm)	P _{incremental} (mm)	P _{ordenada} (mm)	Posição original
330	5,50	24,11	1,68	2,20	16
345	5,75	23,34	1,62	1,99	18
360	6,00	22,63	1,57	1,82	20
375	6,25	21,97	1,51	1,68	22
390	6,50	21,35	1,47	1,57	24
405	6,75	20,77	1,42	1,47	26

Fonte: elaboração própria (2024).

O Gráfico 8 apresenta o hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados, correspondendo aos valores apresentados na Tabela 5.

Gráfico 8 – Chuva de projeto, com TR de 50 anos com blocos de chuva reordenados pelo método dos blocos alternados

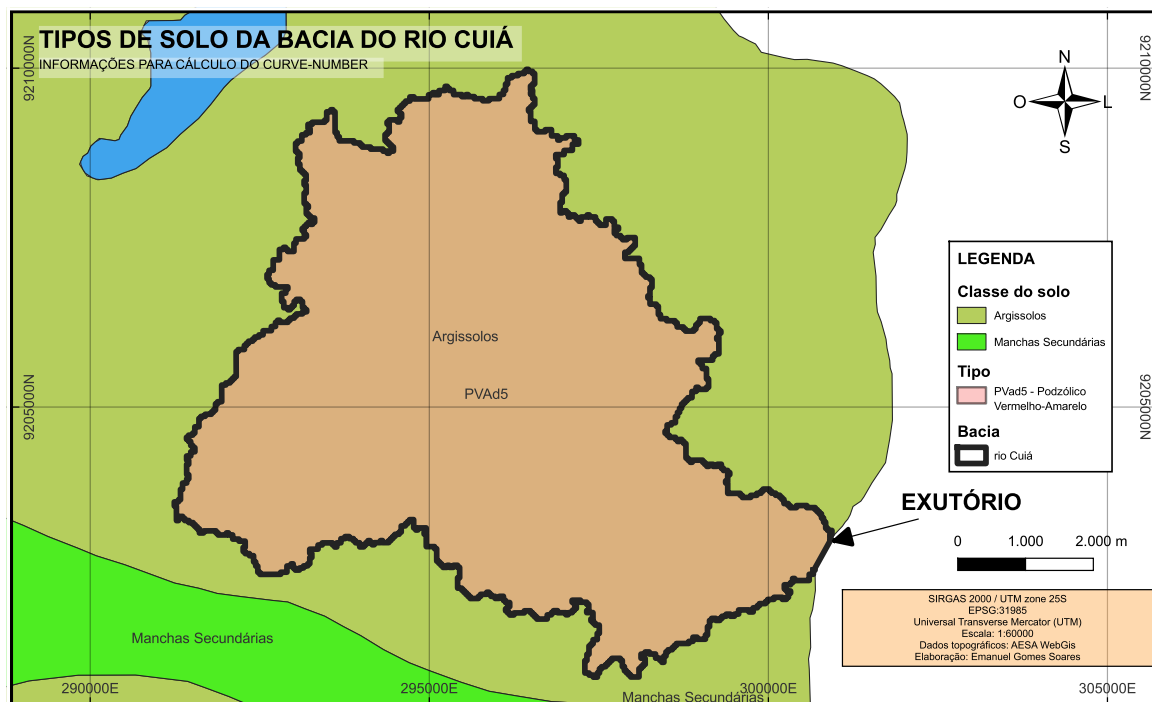


Fonte: elaboração própria (2024).

3.3.5. Determinação do tipo de solo

A definição do tipo de solo foi realizada com base em dados fornecidos pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), os quais foram recortados para a área delimitada neste estudo.

Mapa 10 – Tipo de solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

O solo predominante foi do tipo Argissolo, classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo (PVA5), abrangendo toda a área da bacia hidrográfica, conforme os dados da AESA (2021), e classificado no Grupo hidrológico B por Sartori (2004, p. 83-84). Esse grupo é caracterizado por solos com moderada capacidade de infiltração quando bem drenados e com textura média a grossa.

3.3.6. Determinação da chuva efetiva

O método SCS-CN, desenvolvido pelo *National Resource Conservation Center* dos EUA, o antigo SCS, é amplamente utilizado para estimar o volume de escoamento superficial, conforme autores como Collischonn e Dornelles (2015).

As chuvas efetivas, definidas por Pimentel (2015, p. 255) como “aquela que não fica retida superficialmente, nem infiltra. Ou seja, é a parcela da precipitação total que se transforma em escoamento direto”, sendo superficial e subsuperficial, foram calculadas por esse método SCS-CN, utilizando o parâmetro *Curve-Number* (CN).

Collischonn e Dornelles (2015, p. 139) explicam que esse método é baseado na equação do balanço hídrico, sendo aplicada na superfície do solo conforme a Equação (11):

$$P = I_a + F + Q \quad (11)$$

em que, P é a precipitação ocorrida ao longo de um evento de chuva (mm); Q é a chuva efetiva ou escoamento superficial ao longo do evento (mm); F é a infiltração acumulada ao longo do evento de chuva (mm) e I_a são perdas iniciais, que incluem acúmulo de água na superfície, interceptação e infiltração no solo antes do início da geração de escoamento superficial (mm).

Esse método considera duas hipóteses, como explicado por Collischonn e Dornelles (2015, p. 139), sendo a primeira representada pela Equação (12):

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S_D} \quad (12)$$

em que, S_D é a máxima infiltração acumulada potencial (mm), podendo ser obtida a partir da Equação (13)

$$S_D = \frac{25400 - 254}{CN} \quad (13)$$

em que, CN é o *Curve-Number* “número de curva” (≤ 100) (quando o número de curva é igual a 100, o armazenamento é nulo). Os valores de CN são tabelados em função do tipo de solo e do uso e ocupação existentes na área de estudo.

A segunda hipótese, segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 139), considera que as perdas iniciais correspondem a 20% da infiltração máxima acumulada potencial, sendo esta relação representada pela Equação (14):

$$I_a = 0,2 * S_D \quad (14)$$

A combinação das duas hipóteses permite chegar à estimativa do escoamento superficial a partir de dados de vazão e de características da bacia hidrográfica, segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 139), resultando na Equação (15).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S_D}, \text{ quando } P > I_a \quad (15)$$

$$Q = 0, \text{ quando } P \leq I_a$$

A determinação do parâmetro CN , é dada em função do grupo hidrológico do solo (Quadro 10) e das características de ocupação da área.

Quadro 10 - Tipos de solos considerados no método SCS-CN para a determinação do valor do parâmetro CN

Tipo	Características
A	Solos arenosos, profundos, teor de argila menor que 8%, baixo teor de húmus; tem alta capacidade de infiltração e geram pequenos escoamentos
B	Solos arenosos pouco profundos, teor de argila inferior a 15%, tem menor capacidade de infiltração e geram maiores escoamentos do que o solo A.
C	Solos com teor de argila (entre 20% e 30%); tem menor capacidade de infiltração e geram maiores escoamento do que A e B.
D	Solos argilosos expansivos; tem baixa capacidade de infiltração e geram grandes escoamentos.

Fonte: Pimentel (2015, p. 140).

Tucci (2001) traz valores de CN para bacias urbanas e rurais com diferentes coberturas e uso do solo do SCS, conforme exposto no Quadro 11.

Quadro 11 - Valores de CN para bacias hidrográficas urbanas e suburbanas

Utilização	Cobertura do solo	A	B	C	D
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios	Boas condições	39	61	74	80
Prado	Em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas Florestais	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Parques de estacionamento, telhados, viadutos etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: adaptado de Tucci (2001, p. 406).

Um estudo conduzido por Sartori (2004, p. 83-84) e pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2018, p. 5) enquadraram os solos brasileiros no método do SCS-CN conforme o Quadro 12.

Quadro 12 – Grupo de solos do método SCS aplicado no Brasil

Grupo Hidrológico	Descrição
A	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: adaptado de ANA (2018, p. 5).

Os valores de CN para cada uma das sub-bacias hidrográficas foram estimados por meio da contagem de *pixels* em cada cenário, com base nos valores de área de cada uso ou cobertura do solo. Esses valores foram obtidos a partir do histograma *raster* gerado pela classificação supervisionada. Nos Cenários II e III, cada *pixel* representa uma área de 9 m², enquanto no Cenário I, 462,25 m². O resultado utilizado corresponde à média ponderada dos valores de CN obtidos.

3.3.7. Determinação dos hidrogramas de cheia

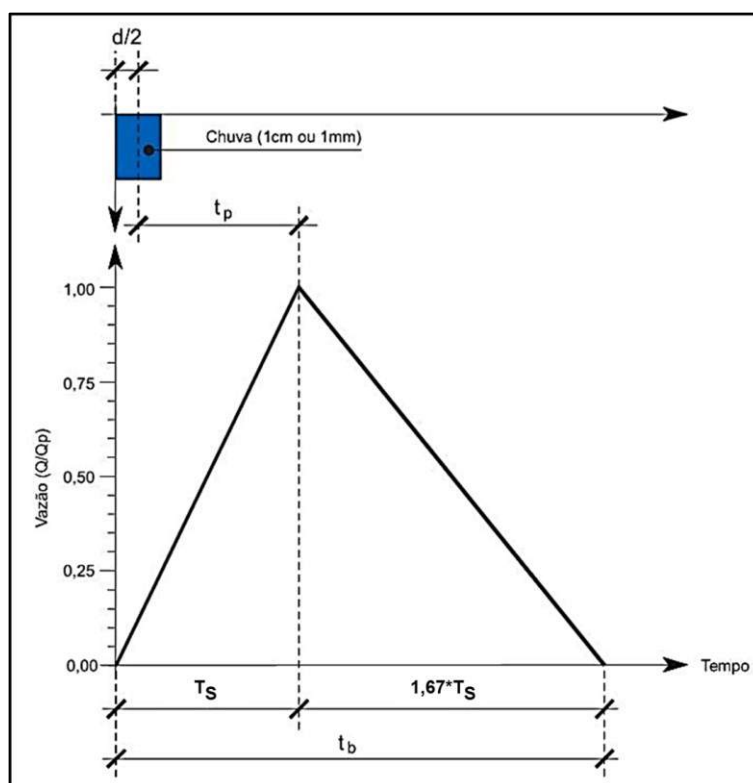
3.3.7.1. Hidrograma unitário

Para converter chuva em vazão, frequentemente é utilizado o método do Hidrograma Unitário Sintético Triangular do SCS (HUT). Esse método, conforme Tucci

(2001, p. 414), representa a resposta a um evento de chuva de volume unitário com duração (Δt).

Por sua vez, segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 156), o HUT deve corresponder à chuva efetiva de mesma duração e ter o mesmo tempo de base. Essa representação pode ser aproximada por um triângulo, definido pelos seguintes parâmetros: vazão de pico (Q_p), tempo de pico (T_p), tempo de subida (T_s) e tempo de base (T_b), conforme exemplificado na Figura 23.

Figura 23 – Forma do hidrograma unitário sintético triangular do SCS



Fonte: Collischonn e Dornelles (2015, p. 154).

A construção de um HUT se dá pela determinação do T_c que pode ser estimado com o uso de diversas equações. O T_p , segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 157) é estimado como 60% do T_c da bacia hidrográfica, conforme a Equação (16):

$$T_p = 0,6 * T_c \quad (16)$$

e o T_s do HUT pode ser estimado como o T_p mais a metade da duração da chuva d (Δt), conforme a Equação (17):

$$T_S = T_p + \left(\frac{\Delta t}{2}\right) \quad (17)$$

o T_b do HUT é aproximado com o uso da Equação (18):

$$T_b = T_S + 1,67 * T_p \quad (18)$$

O tempo de recessão T_{rec} é aproximado pela Equação (19):

$$T_{rec} = 1,67 * T_p \quad (19)$$

Por fim, a Q_p para uma chuva efetiva de 1 mm, pode ser calculada pela Equação (20).

$$Q_p = \frac{0,208 * A_d}{T_S} \quad (20)$$

em que, A_d corresponde a área de drenagem da bacia hidrográfica (em km^2) e T_S é o tempo de subida (em minutos).

3.3.7.2. Convolução

É possível calcular os hidrogramas resultantes de um evento complexo com o uso de um HUT a partir da convolução, conforme destacam Collischonn e Dornelles (2015, p. 147). A vazão em um intervalo de tempo Δt pode ser calculada com o uso da convolução entre as funções P (chuva efetiva) e h (ordenadas do hidrograma unitário discreto), conforme as Equações (21) e (22):

$$Q_t = \sum_{i=1}^t P_{ef_i} * h_{t-i+1}, \text{ para } t < k \quad (21)$$

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t P_{ef_i} * h_{t-i+1}, \text{ para } t \geq k \quad (22)$$

em que, Q_t é a vazão do escoamento superficial no intervalo de tempo t ; h é a vazão por unidade de chuva efetiva do hidrograma unitário; P_{ef_i} é a precipitação efetiva do bloco i e k é o número de ordenadas do hidrograma unitário obtido por $k = n - m + 1$, sendo m o número de pulsos de precipitação e n o número de valores de vazões do hidrograma.

Collischonn e Dornelles (2015, p. 148) ressaltam que o cálculo de vazões usando o Hidrograma Unitário pode ser trabalhoso quando realizado manualmente. Por isso, é comum utilizar equações em forma matricial (Quadro 13) por meio planilhas de cálculo eletrônico, como foi utilizado nesse estudo com o uso do Microsoft Excel 365.

Quadro 13 – Exemplificação de cálculo de um hidrograma em planilha de cálculo eletrônica

Hidrograma resultante	Hidrograma da Chuva 1	Hidrograma da Chuva 2	Hidrograma da Chuva 3	Total
Q_1	$P_1 * q_1$			$P_1 * q_1$
Q_2	$P_1 * q_2$	$P_2 * q_1$		$P_1 * q_2 + P_2 * q_1$
Q_3	$P_1 * q_3$	$P_2 * q_2$	$P_3 * q_1$	$P_1 * q_3 + P_2 * q_2 + P_3 * q_1$
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
Q_9	$P_1 * q_9$	$P_2 * q_8$	$P_3 * q_7$	$P_1 * q_9 + P_2 * q_8 + P_3 * q_7$
Q_{10}		$P_2 * q_9$	$P_3 * q_8$	$P_2 * q_9 + P_3 * q_8$
Q_{11}			$P_3 * q_9$	$P_3 * q_9$

Fonte: adaptado de Collischonn e Dornelles (2015, p. 148).

3.3.8. Modelagem hidrológica no ABC 6

Na modelagem hidrológica, utilizou-se o *software* ABC 6, sendo as sub-bacias hidrográficas dispostas conforme o esquema na Figura 24, sendo adotado o modelo de chuva excedente do SCS, TR de 50 anos e intervalo de discretização de 15 minutos. Além disso foram utilizadas bacias fictícias para interligar os exutórios, uma vez que o *software* não permite a união de 2 nós.

Figura 24 – Esquema utilizado no *software* ABC 6 para determinação da vazão



Fonte: elaboração própria (2024).

Para cada sub-bacia hidrográfica, foram preenchidos os valores de área (km²), tempo de concentração (horas), comprimento do canal (metros), velocidade do canal (m/s) e o coeficiente de amortecimento (0,5) foi adotado para anular o efeito de amortização no canal, conforme ilustrado nas Figura 25 e 26. Esse procedimento foi repetido para os três Cenários de estudo.

Figura 25 – Exemplo dos dados de entrada no *software* ABC 6

Bacia: Sub-bacia 01

Dados da Bacia Precipitação Infiltração

Características Físicas

Área (Km²): 5,332

Área Impermeável (%): 0,0

Área Diretamente Conectada (%): 0,0 } $A_{imp} \geq A_{dir}$

Tempo de Concentração

Tempo de Concentração (h): 2,10

Calculado por: Usuário Equações Empíricas

Dados do Canal

Comprimento (m): 1783,8

Velocidade (m/s): 1,50

Tempo de Trânsito da Onda de Cheia (h): 0,33

Coeficiente de Amortecimento ($0 < x < 0.5$): 0,50000

Ok Cancelar

Fonte: elaboração própria (2024).

Figura 26 – Exemplo de entrada de dados no *software* ABC 6 na aba infiltração

Bacia: Sub-bacia 01

Dados da Bacia Precipitação **Infiltração**

Green e Ampt

Fator de Sucção-Armazenamento (mm): 41,00

Condutividade Hidráulica do Solo (mm/h): 4,00

Relacionar CN

Horton

Taxa de Infiltração Inicial (mm/h): 254,00

Taxa de Infiltração Final (mm/h): 25,00

Infiltração Acumulada (mm): 48,00

Índice Fi

Índice Médio de Infiltração (mm/h): 5,00

SCS

Número da Curva da Área Permeável: 81

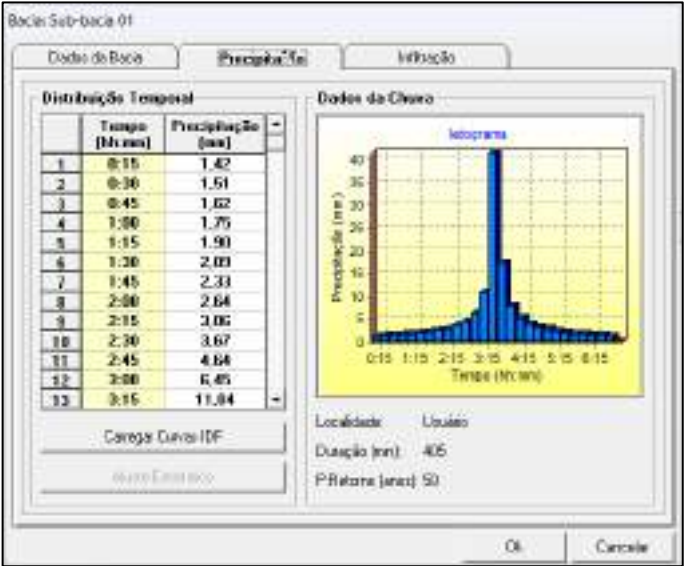
Curvas CN

Ok Cancelar

Fonte: elaboração própria (2024).

Foi adotada a chuva de projeto (Figura 27), obtida na Tabela 5, devido à desatualização da curva IDF fornecida pelo *software*. Os hidrogramas de cada sub-bacia hidrográfica também foram calculados no Microsoft Excel 365 para verificar a precisão dos dados do *software*.

Figura 27 – Chuva de projeto aplicada no *software* ABC 6



Fonte: elaboração própria (2024).

3.4. Pré-dimensionamento de bacia de retenção

Em bacias hidrográficas intensamente urbanizadas, onde é difícil implementar medidas de controle na fonte, autores como Canholi (2014, p. 9) recomendam o uso de dispositivos de macrodrenagem, como as bacias de retenção. Essas são extremamente eficazes em cidades com altas taxas de impermeabilização, devido ao rápido impacto no controle de inundações localizadas.

A modelagem da propagação de hidrogramas de cheia em uma unidade de armazenamento (bacias de retenção) foi realizada pelo método de Puls modificado. Conforme explicado por Baptista, Nascimento e Barraud (2011, p. 122), esse método foca apenas nas relações de armazenamento, sem considerar processos dinâmicos, e baseia-se em três equações.

A primeira equação é a da continuidade aplicada a um reservatório de forma concentrada, dada pela Equação (23):

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (23)$$

em que: S é o volume (m^3), t é o tempo (s), I é a vazão afluente (m^3/s) e Q a vazão de saída do reservatório (m^3/s).

Essa equação diferencial pode ser aproximada com uso de aproximação por diferenças finitas, segundo Collischonn e Dornelles (2015, p. 251), resultando na Equação (24):

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (24)$$

em que: Δt é o tamanho do intervalo de tempo (s); S_t é o volume armazenado no reservatório no início do intervalo de tempo (m^3); S_{t+1} é o volume armazenado no reservatório no final do intervalo de tempo (m^3); I_t e I_{t+1} são as vazões de entrada no reservatório em t e $t+1$ (m^3/s); e Q_t e Q_{t+1} são as vazões de saída do reservatório em t e $t+1$ (m^3/s).

As vazões I_t e I_{t+1} , são conhecidas a partir do hidrograma de entrada. O volume inicial S_t quando $t = 0$ também é conhecido, restando como incógnitas as variáveis

Q_{t+1} e S_{t+1} . Reorganizando a Equação (24), de modo que as variáveis conhecidas fiquem do lado direito e os desconhecidos no esquerdo, é possível obter a Equação (25):

$$\frac{2 * S_{t+1}}{\Delta t} + Q_{t+1} = I_t + I_{t+1} + \frac{2 * S_t}{\Delta t} - Q_t \quad (25)$$

para resolver este sistema com duas incógnitas, Baptista, Nascimento e Barraud (2011, p. 124) e Collischonn e Dornelles (2015, p. 251) explicam que é necessária uma equação adicional, obtida pela relação entre o armazenamento S e a vazão de saída Q , sendo representada por uma função na forma da Equação (26):

$$Q_{t+1} = f\left(\frac{2 * S_t}{\Delta t} + Q_t\right) \quad (26)$$

A função f é determinada por tabelas ou curvas preparadas previamente, pois tanto S quanto Q são funções do nível da água (h) no reservatório.

3.4.1. Estruturas de saída de bacias de retenção

Para bacias de retenção *on-line*, a vazão de saída depende do tipo e das dimensões de sua estrutura de controle. As relações entre o nível d'água (N.A) e as vazões de saída podem ser obtidas com o uso de parâmetros hidráulicos aplicados às relações básicas do escoamento, conforme Canholi (2014, p. 182).

No Brasil, as estruturas de controle de saída mais comuns em bacias de retenção do tipo *on-line* podem ser classificadas em dois grupos principais: orifícios e soleiras vertentes. Dependendo das características do hidrograma de saída desejado, pode-se adotar uma combinação dessas estruturas, conhecidas como estruturas de controle mistas (Canholi, 2014, p. 183).

Canholi (2014, p. 183) destaca que, normalmente, em bacias de retenção são adotados orifícios de fundo, associados a extravasores de emergência, que têm o objetivo de garantir o nível d'água máximo a ser atingido na bacia de retenção. Esses extravasores são compostos por vertedores de soleiras livres.

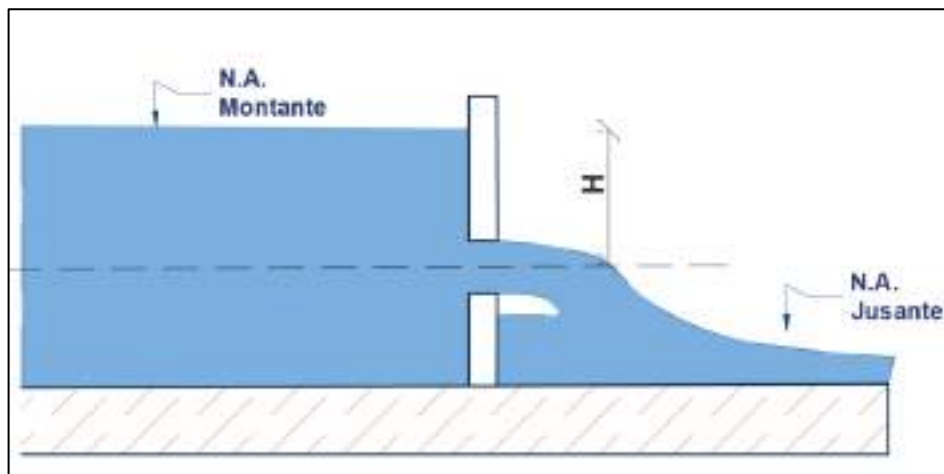
Para dispositivos do tipo orifício de fundo (Figura 28), a vazão é dada pela Equação (27):

$$Q = C * A * \sqrt{2 * g * (H - H_e)} \quad (27)$$

em que, Q é a vazão do vertedor em m^3/s ; A é a área da seção transversal do orifício (m^2); g é a aceleração da gravidade em ($m*s^2$); L é o comprimento da soleira (m); e $H - H_e$ é a altura da água desde a superfície até o centro do orifício (m);

Quando o valor de h é 3 vezes maior que o diâmetro do orifício, o valor de C se aproxima de 0,6. Quando o valor de h é próximo ao diâmetro do orifício, o valor de C se aproxima de 0,5 (Canholi, 2014).

Figura 28 – Escoamento em dispositivo do tipo orifício de fundo



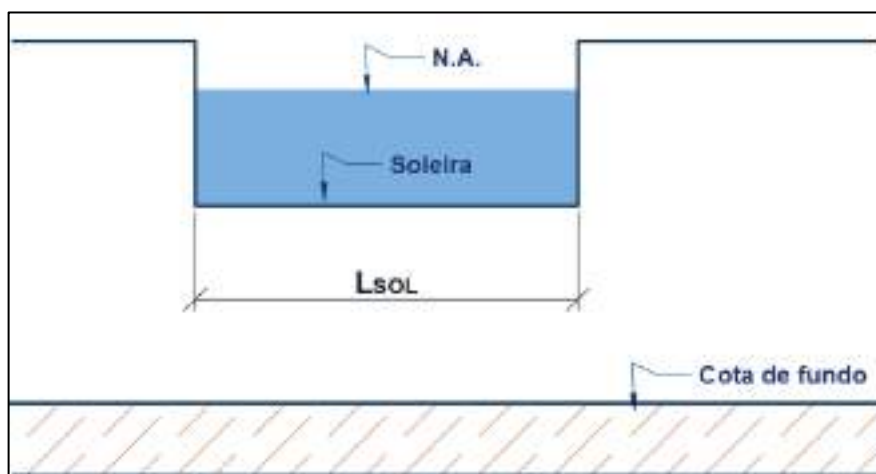
Fonte: adaptado de Canholi (2014, p. 183).

Para dispositivos extravasores com soleira livre (Figura 29), a vazão é dada pela Equação (28):

$$Q = C * L_{sol} * (H - H_s)^{\frac{3}{2}} \quad (28)$$

em que, Q é a vazão do vertedor em m^3/s ; L_{sol} é o comprimento da soleira (m); $H - H_s$ é a diferença da cota de nível da água no reservatório e da cota da soleira do vertedor (m) e C é um coeficiente com valores entre 1,4 e 1,8.

Figura 29 - Escoamento em dispositivo do tipo descarregador de fundo



Fonte: adaptado de Canholi (2014, p. 191).

3.4.2. Simulação

Para cada valor de cota que pode ser atingida no reservatório, foi calculado um valor de vazão (Q_{total}), com uso das Equações 27 e 28, que deve ser somado a um valor de volume S e multiplicado por 2, dividido pelo intervalo de tempo de cálculo.

Assim, os valores de vazão foram ordenados e os de $Q + \frac{2*S}{\Delta t}$, são as abscissas da função f da Equação (25), obtida por meio de uma curva auxiliar. A partir disso foi possível simular o escoamento no reservatório. O Quadro 14 expõe os passos para realizar a simulação do reservatório.

Quadro 14 – Passos para simulação utilizados na bacia de detenção

Passos para simulação do reservatório	
1.	No tempo $t=0$, considera-se o valor inicial do nível da água no reservatório, ou seja, 0 m.
2.	Para o intervalo de tempo $t+1$, calcula-se o termo da direita da Equação 24.
3.	O valor obtido no passo anterior corresponde a abscissa (eixo horizontal) da Equação 25, que aplicando corresponde ao valor de Q_{t+1} .
4.	O valor de S_{t+1} é definido a partir da Equação 24.
5.	Repetem-se os passos 2 a 4 para todos os intervalos de tempo.

Fonte: adaptado de Collischonn e Dornelles (2015).

O pré-dimensionamento, voltado à contenção de cheias, foi realizado a montante do ponto crítico (sub-bacia hidrográfica 05), localizado na ponte entre os

bairros Mangabeira e Valentina (Figura 17). Os cálculos foram realizados no Microsoft Excel 365 por meio de uma curva auxiliar do tipo polinomial de grau 5, utilizando como vazão de entrada a obtida no Cenário II (atual) e, como vazão de saída, a do Cenário I (passado). Esse procedimento, descrito no Quadro 14, foi repetido até encontrar a melhor configuração para o reservatório. Para simplificação, foi adotada uma forma genérica de área retangular e paredes verticais na geometria do reservatório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da determinação do MDE para o estudo, foi possível caracterizar e definir os trechos para a elaboração dos resultados deste trabalho. Como resultado do processamento e extração dos fluxos do MDE, tem-se que o rio principal é o Cuiá, que dá nome a bacia hidrográfica e está definida fisicamente conforme os dados expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Informações relativas ao principal curso d’água da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá

Nome	Rio principal	Área		Perímetro	
		m ²	km ²	m	km
Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá	Cuiá	45212190,20	45,21	55444,00	55,44

Fonte: elaboração própria (2024).

Como explicado anteriormente, para melhorar a simulação do escoamento superficial da bacia, ela foi dividida em nove sub-bacias hidrográficas, cujas informações estão detalhadas a seguir na Tabela 7.

Tabela 7 - Informações relativas a divisão das sub-bacias hidrográficas do Rio Cuiá

Sub-bacia hidrográfica	Rio principal	Área		Perímetro	
		m ²	km ²	m	km
01	Cuiá	5.331.672,81	5,3317	14.367,61	14,368
02	Sem nome	4.103.642,97	4,1036	17.744,37	17,744
03	Sem nome	5.755.181,32	5,7552	20.754,15	20,754
04	Laranjeiras	10.098.446,8	10,098	26.403,97	26,404
05	Sem nome	2.491.904,75	2,4919	11.421,21	11,421
06	Riacho das Graças	4.670.937,88	4,6709	17.438,38	17,438
07	Sem nome	5.880.393,58	5,8804	19.771,34	19,771
08	Riacho Savanhá	4.969.627,84	4,9696	18.727,24	18,727
09	Mangabeira	1.910.382,23	1,9104	9.639,236	9,6392

Sub-bacia hidrográfica	Rio principal	Área		Perímetro	
		m²	km²	m	km
Soma	-	45.212.190,20	45,21	156.267,51	156,27

Fonte: elaboração própria (2024).

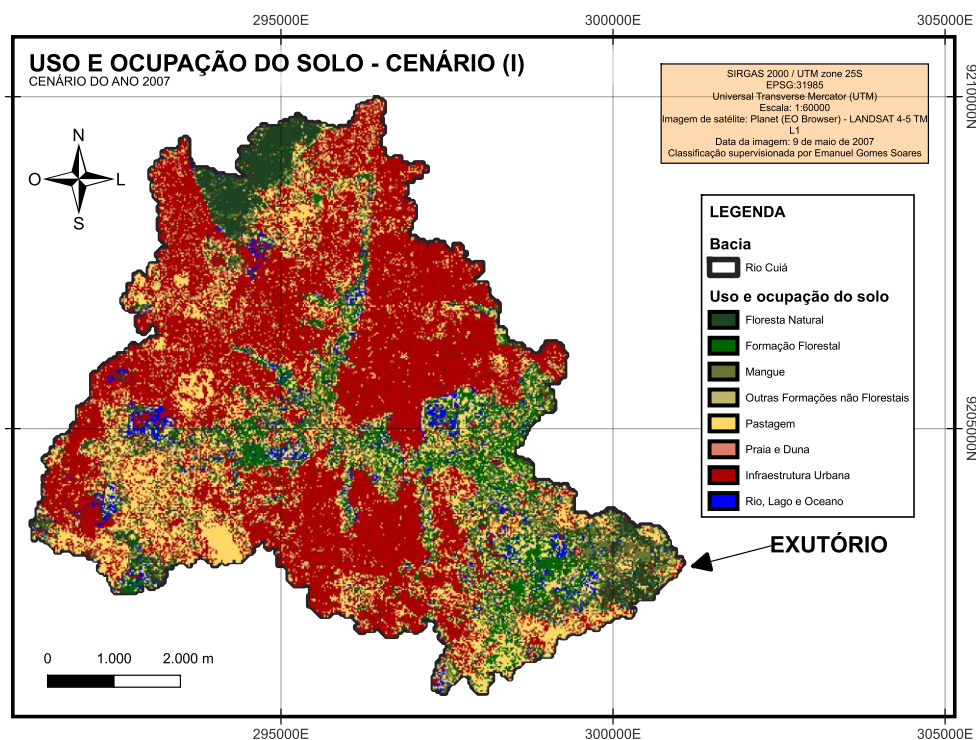
4.1. Caracterização do uso e ocupação do solo nos cenários de estudo

A análise dos cenários se deu pela representação de três épocas distintas na bacia.

4.1.1. Cenário I (passado - 2007)

Esse cenário, por meio da classificação supervisionada apresentou uma grande representatividade do uso do solo do tipo pastagem (Mapa 11), embora já apresente uma considerável área de infraestrutura urbana, porém menor do que na ocupação atual da bacia hidrográfica.

Mapa 11 – Mapa de uso e ocupação do solo obtido com base na classificação supervisionada para o Cenário I (passado)



Fonte: elaboração própria (2024).

Como resultado, tem-se os valores expostos na Tabela 8.

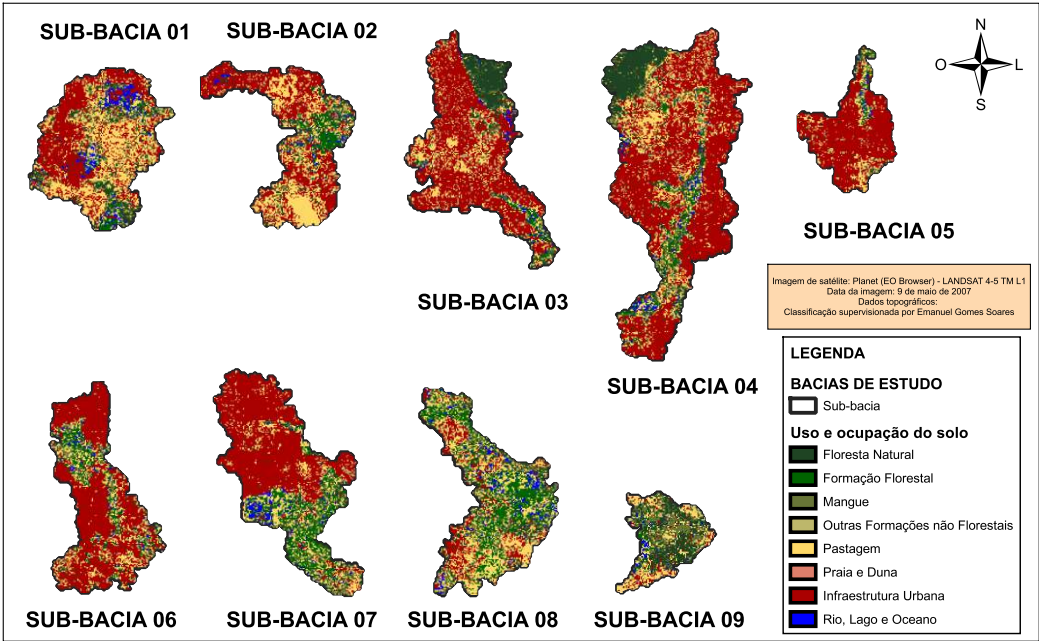
Tabela 8 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade *pixel* para o Cenário I

Uso obtido na classificação	Contagem de pixels	Área (m²)	Área (km²)	% área
Floresta Natural	6.870	3.172.803,807	3,17	7,02%
Formação Florestal	8.938	4.127.877,791	4,13	9,13%
Mangue	7.201	3.325.671,065	3,33	7,36%
Outras Formações Não Florestais	3.595	1.660.295,442	1,66	3,67%
Pastagem	20.836	9.622.786,044	9,62	21,28%
Praia e Duna	338	156.100,1	0,16	0,35%
Infraestrutura Urbana	47.599	21.982.865,85	21,98	48,62%
Rio, Lago e Oceano	2.527	1.167.056,073	1,17	2,58%
Soma	97.904,00	45.215.456,18	45,22	100,00%

Fonte: elaboração própria (2024).

Como resultado para as etapas posteriores de cálculo de tempo de concentração e CN foi necessário recortar o uso e ocupação do solo nas nove sub-bacias hidrográficas, uma vez que, naturalmente cada uma delas apresentam características distintas (Figura 30).

Figura 30 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos e ocupações do solo no Cenário I

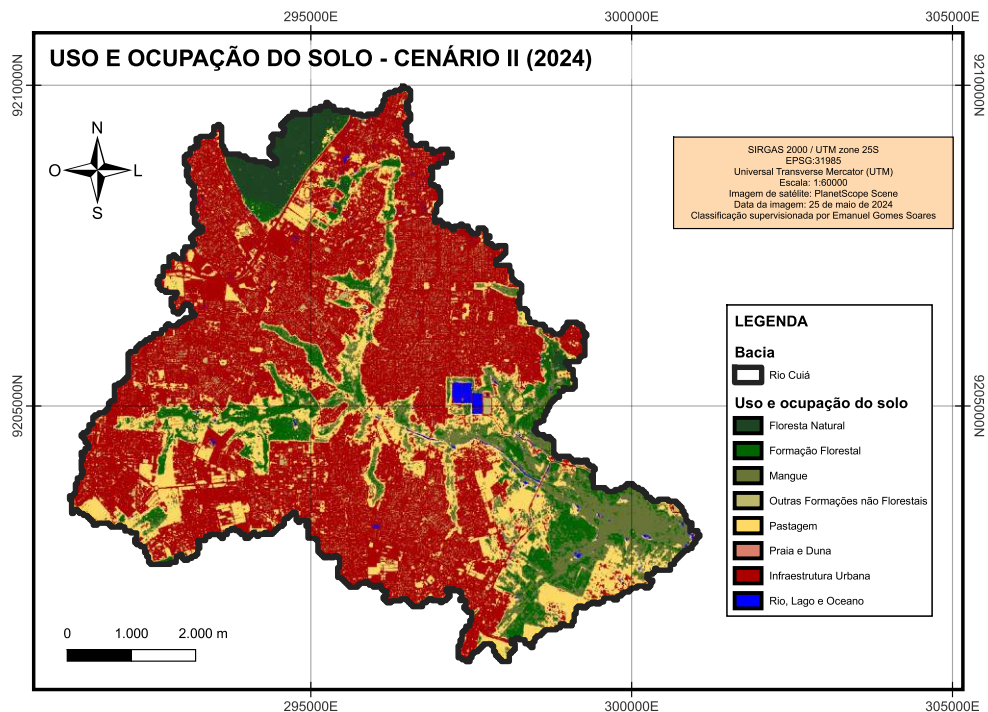


Fonte: elaboração própria (2024).

4.1.2. Cenário II (atual - 2024)

Esse cenário, por meio da classificação supervisionada apresentou uma alta representatividade da infraestrutura urbana (Mapa 12), na ocupação atual da bacia hidrográfica, o que condiz com o aumento do processo de urbanização desta.

Mapa 12 – Mapa de uso e ocupação do solo obtido com base na classificação supervisionada para o Cenário II (atual)



Fonte: elaboração própria (2024).

Como resultado, tem-se os valores expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade *pixel* para o Cenário II

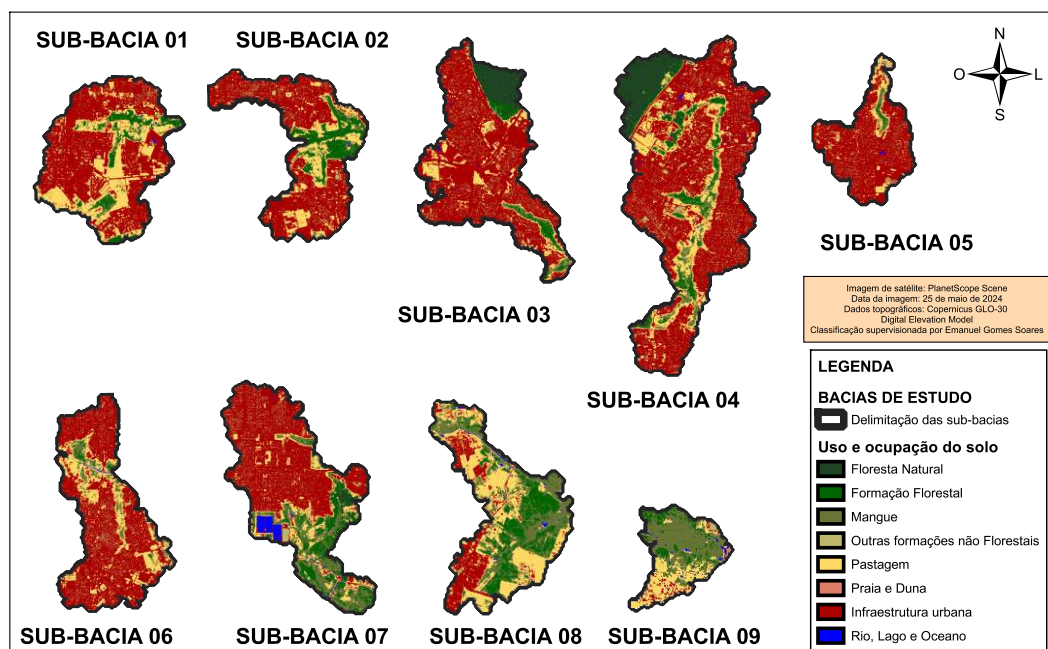
Uso obtido na classificação	Contagem de <i>pixels</i>	Área (m ²)	Área (km ²)	% área
Floresta Natural	169.179,00	1.522.611,00	1,52	3,37%
Formação Florestal	342.587,00	3.083.283,00	3,08	6,82%
Mangue	525.623,00	4.730.607,00	4,73	10,46%
Outras Formações Não Florestais	243.064,00	2.187.576,00	2,19	4,84%
Pastagem	988.285,00	8.894.565,00	8,89	19,67%
Praia e Duna	736,00	6.624,00	0,01	0,01%
Infraestrutura Urbana	2.715.235,00	24.437.115,00	24,44	54,04%
Rio, Lago e Oceano	40.038,00	360.342,00	0,36	0,80%

Uso obtido na classificação	Contagem de pixels	Área (m ²)	Área (km ²)	% área
Soma	5.024.747,00	45.222.723,00	45,22	100,00%

Fonte: elaboração própria (2024).

A Figura 31 traz um recorte das nove sub-bacias hidrográficas e seus usos e ocupações do solo no Cenário II.

Figura 31 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos do solo no Cenário II

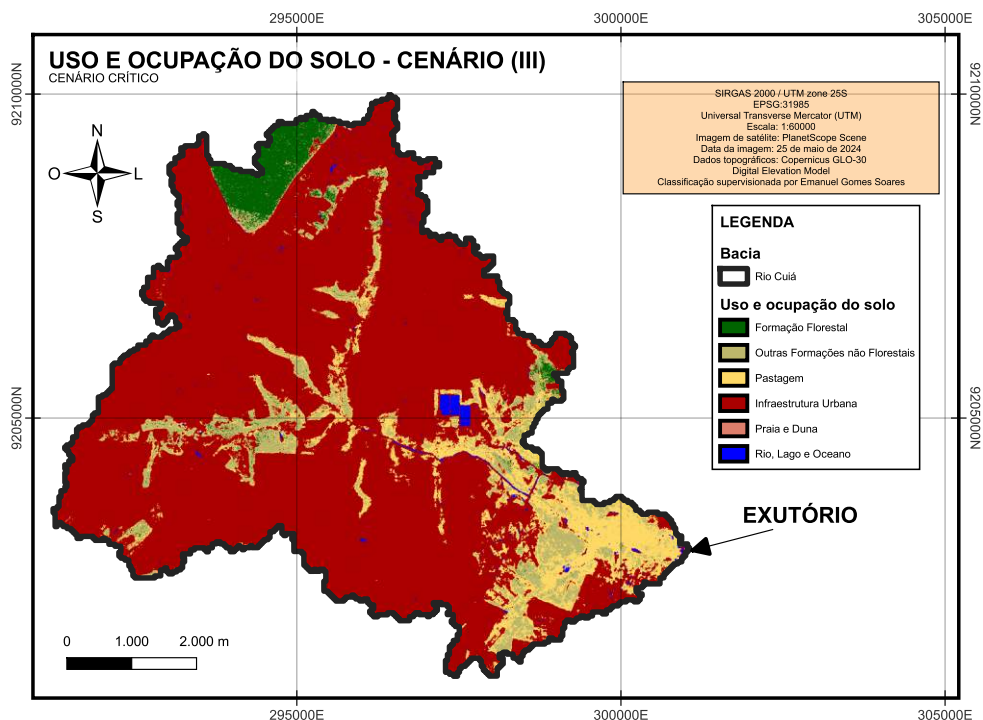


Fonte: elaboração própria (2024).

4.1.3. Cenário III (futuro)

O Cenário III consiste na alteração pessimista do uso e ocupação da bacia hidrográfica diagnosticada atualmente no Cenário II, conforme mostrado no Mapa 13.

Mapa 13 – Uso e ocupação do solo no Cenário III (futuro) na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

O Cenário III (futuro) foi construído de modo que apresente uma urbanização mais intensa, com grande impermeabilização do solo, por meio de alterações nos usos e ocupações do Cenário II, de modo que:

- I. Áreas atuais do tipo **Floresta Natural** se tornaram do tipo **Formação Florestal**;
- II. Áreas atuais do tipo **Formação Florestal** se tornaram do tipo **Outras Formações não Florestais**;
- III. Áreas atuais do tipo **Outras Formações** se tornaram do tipo **Infraestrutura Urbana**;
- IV. Áreas atuais do tipo **Pastagem** se tornaram do tipo **Infraestrutura Urbana**;
- V. Áreas atuais do tipo **Mangue** foram convertidas para áreas do tipo **Pastagem**;
- VI. **Praia e Duna, Rio Lago e Oceano permanecem inalterados.**

Como resultado, têm-se os valores expostos na Tabela 10.

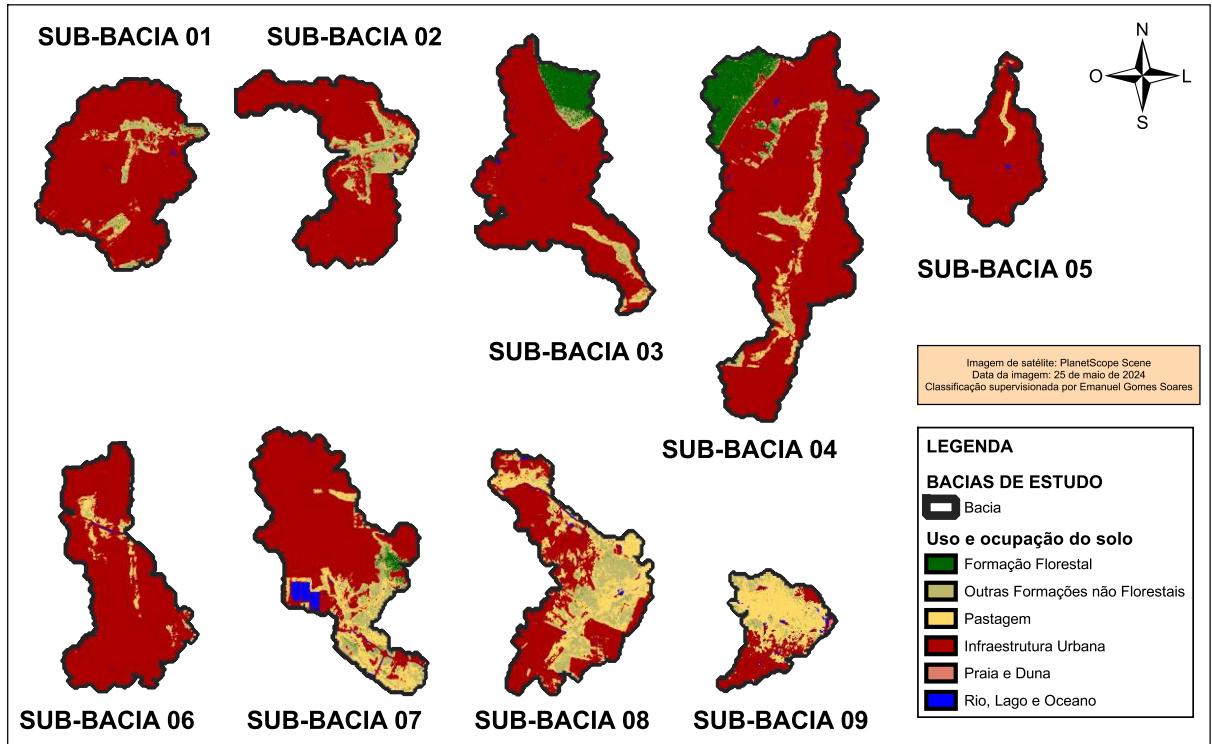
Tabela 10 – Resultado da classificação supervisionada em quantidade *pixel* para o Cenário III

Uso obtido na classificação	Contagem de <i>pixels</i>	Área (m²)	Área (km²)	% área
Formação Florestal	169.179,00	1.522.611,00	1,522611	3,37%
Outras Formações Não Florestais	342.587,00	3.083.283,00	3,083283	6,82%
Pastagem	525.623,00	4.730.607,00	4,730607	10,46%
Praia e Duna	736,00	6.624,00	0,006624	0,01%
Infraestrutura Urbana	3.946.584,00	35.519.256,00	35,519256	78,54%
Rio, Lago e Oceano	40.038,00	360.342,00	0,360342	0,80%
Soma	5.024.747,00	45.222.723,00	45,22	100,00%

Fonte: elaboração própria (2024).

Na Figura 32 é exibido um recorte das sub-bacias hidrográficas e seus usos e ocupações do solo no Cenário III.

Figura 32 – Sub-bacias hidrográficas e seus respectivos usos do solo no Cenário III



Fonte: elaboração própria (2024).

4.2. Análise do parâmetro CN

As áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir do histograma *raster*, gerado pela classificação supervisionada. No Cenário I, cada *pixel* tem dimensões espaciais de 21,50 m x 21,50 m, correspondendo a área de 462,25 m². Já nos Cenários II e III, cada *pixel* possui dimensões espaciais de 3 m x 3 m, correspondendo a área de 9 m². Para cada tipo de uso do solo, foi definido um CN específico, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 – Valores adotados para os CNs, segundo o uso obtido na classificação supervisionada

Uso obtido na classificação	CN adotado	Descrição
Floresta Natural	55	Bosques ou zonas Florestais - Boas condições
Formação Florestal	66	Bosques ou zonas Florestais - cobertura ruim
Mangue	55	Bosques ou zonas Florestais - Boas condições
Outras Formações Não Florestais	82	terra
Pastagem	79	Pastagens ou terrenos em más condições
Praia e Duna	61	Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições
Infraestrutura Urbana	85	Zonas residenciais lotes de <500 (m ²)
Rio, Lago e Oceano	-	

Fonte: elaboração própria (2024).

Para cada sub-bacia hidrográfica, foi determinado um CN utilizando o método do SCS, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores adotados para o CN, em cada uma das sub-bacias hidrográficas nos cenários de estudo

Sub-bacia hidrográfica	CN			Tipo de solo	Classe
	Cenário I	Cenário II	Cenário III		
01	73	81	84	(PVAd5)	B
02	77	80	84	(PVAd5)	B
03	77	80	83	(PVAd5)	B
04	77	79	83	(PVAd5)	B
05	81	83	85	(PVAd5)	B
06	79	82	84	(PVAd5)	B
07	74	75	81	(PVAd5)	B
08	68	70	82	(PVAd5)	B

Sub-bacia hidrográfica	CN			Tipo de solo	Classe
	Cenário I	Cenário II	Cenário III		
09	63	63	80	(PVAd5)	B

Fonte: elaboração própria (2024).

4.3. Análise do escoamento superficial

4.3.1. Análise do tempo de concentração (T_c)

Como resultado da determinação do T_c para cada sub-bacia hidrográfica, conforme o método da onda cinemática (apresentada na seção 3.3.2), foram considerados trechos de escoamento em superfície e em canal natural. A Tabela 12 exhibe os resultados dos T_c para os três cenários de estudo.

Tabela 12 – Tempos de concentração em minutos, para as sub-bacias hidrográficas nos três cenários de estudo

Sub-bacia hidrográfica	Tempo de concentração (min)		
	Cenário I (2007)	Cenário II (2024)	Cenário III (Futuro)
01	289,6	124,4	57,3
02	348,2	70,7	54,2
03	132	132	107,9
04	269	238,2	208,2
05	192,2	41,7	41,7
06	119,4	45,7	45,7
07	216,5	195	181,8
08	328	175,8	114,8
09	298,8	130,3	46,3

Fonte: elaboração própria (2024).

A Tabela 13 exhibe a variação percentual do tempo de concentração para cada sub-bacia hidrográfica nos Cenários II e III em relação ao Cenário I de 2007.

Tabela 13 - Redução percentual do tempo de concentração (T_c) para cada sub-bacia hidrográfica em relação ao Cenário I

Sub-bacia hidrográfica	Redução no Cenário II (%)	Redução no Cenário III (%)
01	57,04%	80,21%
02	79,70%	84,43%
03	0,00%	18,26%
04	11,45%	22,60%

Sub-bacia hidrográfica	Redução no Cenário II (%)	Redução no Cenário III (%)
05	78,30%	78,30%
06	61,73%	61,73%
07	9,93%	16,03%
08	46,40%	65,00%
09	56,39%	84,50%

Fonte: elaboração própria (2024).

4.3.2. Obtenção dos hidrogramas de cheia

A vazão foi estimada a partir da chuva com o uso do Hidrograma Unitário, calculado para cada sub-bacia hidrográfica e cenário específico. As vazões de pico ($Q_{m\acute{a}x}$) e os tempo de pico (T_p) para cada sub-bacia hidrográficas foram obtidos com o uso do *software* ABC 6, considerando a chuva de projeto adotada (Tabela 5), resultando na Tabela 14, que apresenta essas vazões nos três cenários de estudo. Além disso no APÊNDICE A estão dispostos os hidrograma das nove sub-bacias hidrográficas de forma gráfica.

Tabela 14 - Vazões de pico (em m^3/s) e tempos de picos (T_p) nos três cenários de estudo para cada sub-bacia hidrográfica

Sub-bacia hidrográfica	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$Q_{m\acute{a}x}$ (m^3/s)	T_p (em min)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m^3/s)	T_p (em min)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m^3/s)	T_p (em min)
01	19,54	210	47,74	150	85,15	135
02	14,79	375	52,43	135	68,65	135
03	43,43	645	48,38	150	59,44	150
04	44,71	285	52,86	240	64,89	210
05	16,11	180	45,15	120	47,05	120
06	40,08	195	80,70	135	84,30	135
07	27,74	405	31,60	180	39,47	180
08	13,82	225	24,08	180	48,46	165
09	4,67	360	8,52	225	30,73	150

Fonte: elaboração própria (2024).

A Tabela 15 traz um resumo em relação ao aumento da vazão relativa ao Cenário I e da redução no tempo de concentração.

Tabela 15 – Comparação percentual da vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$) e do tempo de pico (T_p) para cada sub-bacia hidrográfica em relao ao Cenário I

Sub-bacia hidrográfica	Aumento da $Q_{m\acute{a}x}$ no Cenário II (em %)	Reduo do T_p no Cenário II (em %)	Aumento da $Q_{m\acute{a}x}$ no Cenário III (em %)	Reduo do T_p Cenário III (em %)
01	144,32%	29,63%	335,77%	44,44%
02	254,50%	43,33%	364,16%	50,00%
03	11,40%	5,26%	36,86%	5,26%
04	18,23%	3,85%	45,14%	15,38%
05	180,26%	27,27%	192,05%	36,36%
06	101,35%	11,11%	110,33%	16,67%
07	13,91%	0,00%	42,29%	8,70%
08	74,24%	24,14%	250,65%	37,93%
09	82,44%	28,57%	558,03%	46,43%

Fonte: elaborao própria (2024).

Observou-se uma variao nas de vazes de pico ($Q_{m\acute{a}x}$) entre os cenários, refletindo os impactos da urbanizao como o aumento da impermeabilizao, gerando alteraes no escoamento superficial. O Cenário I (2007) já mostrava considerável urbanizao, enquanto o Cenário III (futuro) apresenta volumes de escoamento expressivamente maiores devido às mudanas no uso e ocupao do solo, conforme a Tabela 16.

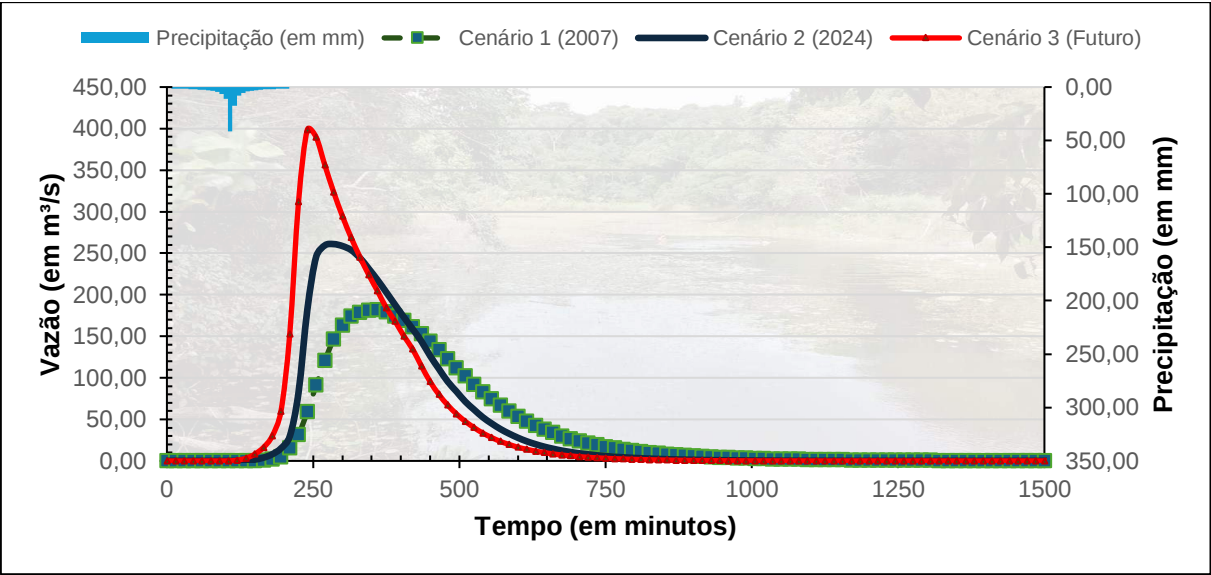
Tabela 16 – Estimativa de volumes escoados (m^3) em cada um dos cenários nas nove sub-bacias hidrográficas

Sub-bacia hidrográfica	Volume escoado (m^3)		
	Cenário I	Cenário II	Cenário III
01	120.750,14	169.970,32	162.319,44
02	122.509,83	142.929,82	137.525,26
03	145.095,53	161.170,81	168.236,46
04	238.381,49	269.872,78	289.266,57
05	67.648,01	53.497,58	55.253,45
06	114.299,79	116.495,55	121.634,13
07	115.773,42	150.729,89	143.019,06
08	100.366,27	95.857,66	132.348,09
09	35.081,84	29.174,82	45.853,65

Fonte: elaborao própria (2024).

Por meio do uso do *software* ABC 6, foi possível simular os hidrogramas no exutório da bacia hidrográfica, conforme o Gráfico 9.

Gráfico 9 – Hidrogramas resultantes nos três cenários no exutório da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Em relação, aos resultados obtidos no exutório, tem-se conforme a Tabela 17:

Tabela 17 - Vazão de pico (em m³/s) no exutório da bacia

Local	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)
Exutório	181,33	360	259,44	300	398,52	240

Fonte: elaboração própria (2024).

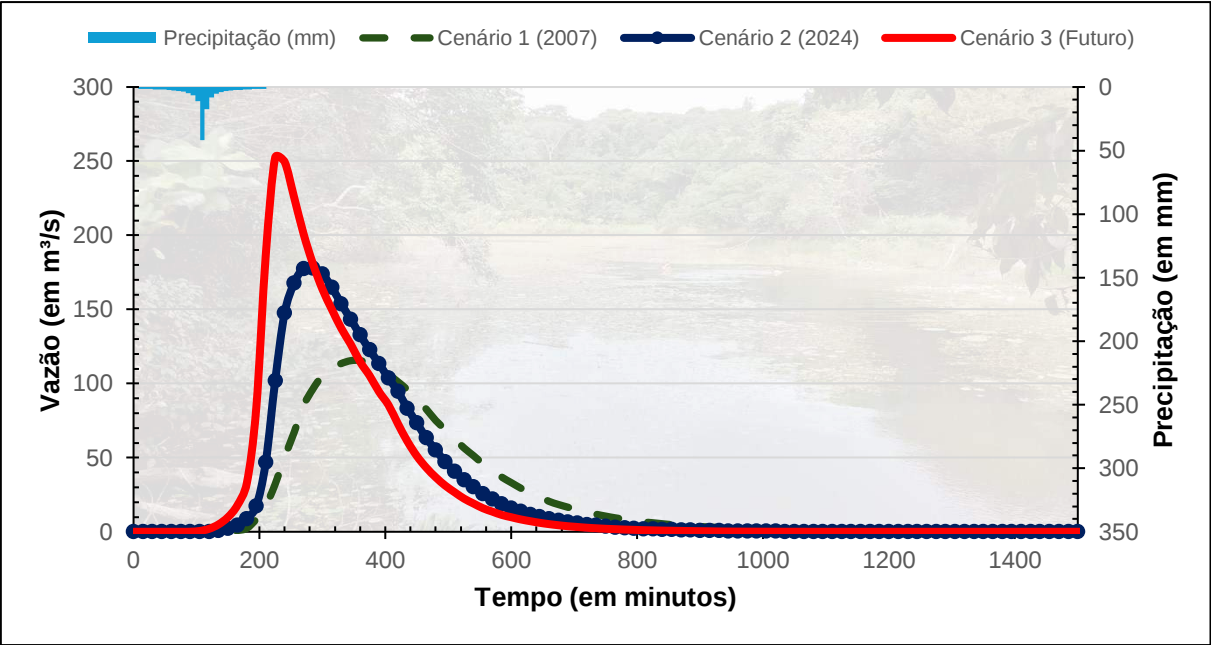
Observou-se um aumento de 43% na vazão de pico ao comparar o Cenário I com o II, e um aumento ainda mais expressivo de 119,8% no Cenário III. Esse aumento no Cenário III é justificado pelo fato de que neste as sub-bacias hidrográficas 08 e 09 apresentam seus usos totalmente alterados para pastagem, que aumenta o escoamento e reduz a infiltração em relação ao Cenário I, gerando uma elevação na vazão. Além disso, a média de escoamento gerado pelo $Q_{\text{máx}}$ (Tabela 14), é de 24,99 m³/s para o Cenário I, 43,49 m³/s para o Cenário II e de 58,68 m³/s para o Cenário III.

Em relação aos tempos de pico, observou-se uma redução de 16,67% do Cenário II para o Cenário I e de 33,33% do Cenário III para o Cenário I, o que demonstra que a urbanização reduz o tempo de concentração e aumenta a vazão nas sub-bacias hidrográficas agravando assim o problema das inundações.

No entanto, o foco deste estudo foi propor uma solução para o ponto crítico da bacia hidrográfica no contexto urbano, situada a montante do exutório da sub-bacia

hidrográfica 06. Assim, a vazão na ponte do Rio Cuiá é oriunda da sub-bacia hidrográfica 05, a qual possui como resultado os hidrogramas apresentados no Gráfico 10 e na Tabela 18.

Gráfico 10 – Hidrogramas resultantes no exutório da sub-bacia 05 do Rio Cuiá



Fonte: elaboração própria (2024).

Tabela 18 - Vazões de pico (em m³/s) no ponto crítico, correspondente ao exutório da sub-bacia hidrográfica 05

Local	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)	$Q_{\text{máx}}$ (m³/s)	T_p (em min)
Exutório 05	115,51	375	177,75	285	252,44	225

Fonte: elaboração própria (2024).

Esses valores representaram um aumento percentual de 53,88% na vazão de pico do Cenário I para o Cenário II e uma redução de 31,57% no tempo de pico. Enquanto para o Cenário III de 118,54% e um tempo de concentração de 66,67%. Esse ponto está situado na região mais urbanizada da bacia hidrográfica (mesmo no Cenário I). Esses dados demonstram a necessidade de medidas preventivas para evitar um cenário ainda mais crítico.

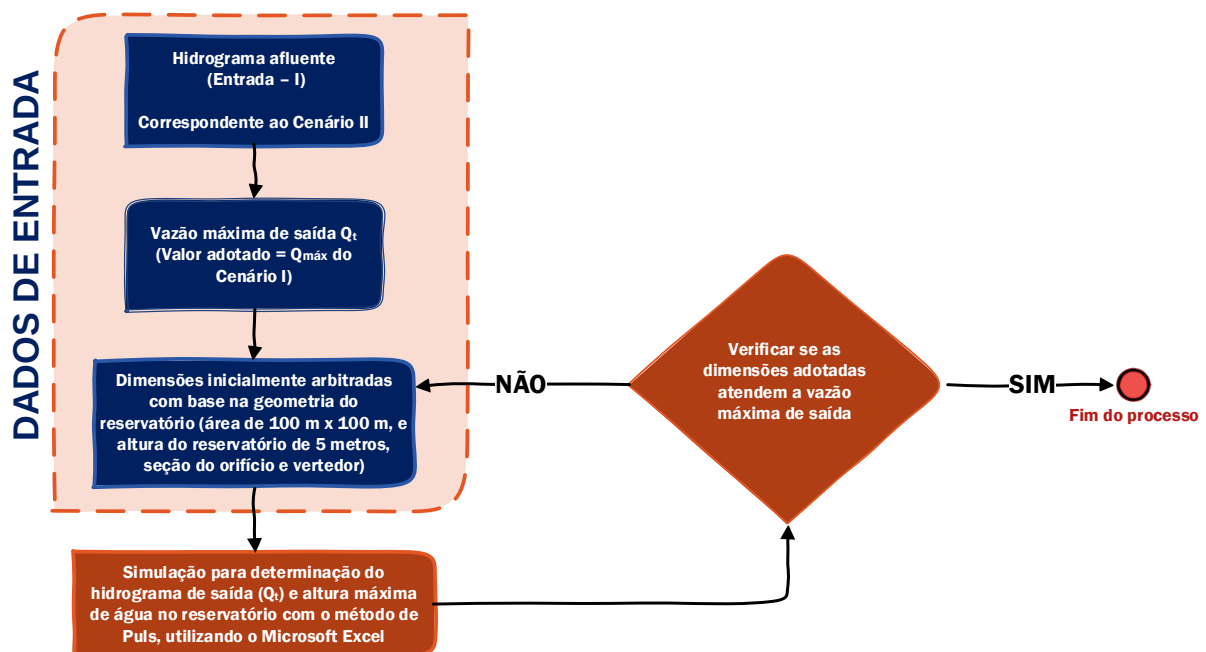
4.4. Avaliação de implantação de uma bacia de retenção

O ponto crítico está localizado na ponte que liga os bairros Mangabeira e Valentina. Para reduzir ou retardar a vazão de pico nesse ponto, foi realizado um pré-dimensionamento um reservatório do tipo *on-line*, a ser instalado na sub-bacia hidrográfica 05, situada a montante da ponte.

Sendo a cheia de TR de 50 anos, para a qual se deseja controle no Cenário II (atual), conforme apresentado no hidrograma exposto no Gráfico 10. Para a construção das curvas Cota-Volume e Cota-Descarga, foi adotado um vertedor como estrutura de emergência, instalado a 0,30 m da crista do reservatório (bacia de retenção). Também foram adotados descarregadores (orifícios) de fundo com diâmetro arbitrado durante as iterações no modelo de Puls, sendo a vazão definida pela Equação 28.

O resultado do pré-dimensionamento foi fruto das iterações (explicadas na seção 3.4), que considerou inicialmente uma área de 100 m x 100 m e também a altura máxima de 5 m, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Passos para pré-dimensionamento do reservatório (bacia de retenção)



Fonte: elaboração própria (2024).

A configuração, utilizando a curva auxiliar que apresentou a melhor solução, resultou nos seguintes parâmetros:

- **Estrutura de descarga (emergencial):** um vertedor livre com soleira de 100 m, instalado na cota de 4,70 m em relação ao nível de referência no solo, com um coeficiente de descarga de 1,40.
- **Descarregadores de fundo:** seis descarregadores de fundo com diâmetro de 2 metro, instalados a 0,20 m do nível de referência no solo para evitar entupimento, com um coeficiente de descarga de 0,60.
- **Dimensão do reservatório:** altura máxima de 5,00 m, largura de 300 m e a base de 560 m, totalizando a área de 168.000,00 m².
- **Vazão máxima de saída:** igual à do Cenário I, ou seja, 115,51 m³/s.

As curvas auxiliares de cálculo, baseadas na relação cota-volume do reservatório (bacia de detenção) obtidas com as Equações 27 e 28, referente as estruturas de descarga, apresentaram as características expostas na Tabela 19 e conforme os Gráficos 11 ao 13.

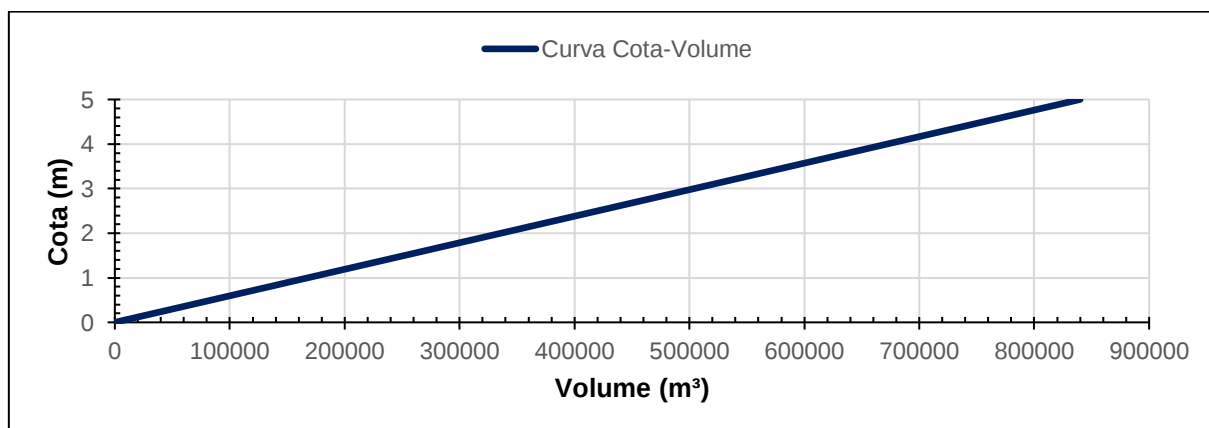
Tabela 19 – Relação cota-volume do reservatório (bacia de detenção) obtidas com uso das equações para o método de Puls

Cota (m)	Volume (m ³)	Q (vertedor)	Q (orifício)	Q total (m ³ /s)	S _t /Δt	(2*S _t /Δt)+(Q _t) (m ³ /s)
0	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00
0,1	16800	0,00	0,00	0,00	18,67	37,33
0,2	33600	0,00	0,00	0,00	37,33	74,67
0,3	50400	0,00	15,84	15,84	56,00	127,84
0,4	67200	0,00	22,40	22,40	74,67	171,74
0,5	84000	0,00	27,44	27,44	93,33	214,11
0,6	100800	0,00	31,68	31,68	112,00	255,68
0,7	117600	0,00	35,42	35,42	130,67	296,76
0,8	134400	0,00	38,80	38,80	149,33	337,47
0,9	151200	0,00	41,91	41,91	168,00	377,91
1,0	168000	0,00	44,81	44,81	186,67	418,14
1,1	184800	0,00	47,53	47,53	205,33	458,19
1,2	201600	0,00	50,10	50,10	224,00	498,10
1,3	218400	0,00	52,54	52,54	242,67	537,87
1,4	235200	0,00	54,88	54,88	261,33	577,54
1,5	252000	0,00	57,12	57,12	280,00	617,12
1,6	268800	0,00	59,27	59,27	298,67	656,61
1,7	285600	0,00	61,35	61,35	317,33	696,02
1,8	302400	0,00	63,37	63,37	336,00	735,37
1,9	319200	0,00	65,32	65,32	354,67	774,65
2,0	336000	0,00	67,21	67,21	373,33	813,88
2,1	352800	0,00	69,05	69,05	392,00	853,05

Cota (m)	Volume (m³)	Q (vertedor)	Q (orifício)	Q total (m³/s)	S _t /Δt	(2*S _t /Δt)+(Q _t) (m³/s)
2,2	369600	0,00	70,85	70,85	410,67	892,18
2,3	386400	0,00	72,60	72,60	429,33	931,26
2,4	403200	0,00	74,30	74,30	448,00	970,30
2,5	420000	0,00	75,97	75,97	466,67	1009,31
2,6	436800	0,00	77,61	77,61	485,33	1048,27
2,7	453600	0,00	79,21	79,21	504,00	1087,21
2,8	470400	0,00	80,78	80,78	522,67	1126,11
2,9	487200	0,00	82,32	82,32	541,33	1164,98
3,0	504000	0,00	83,83	83,83	560,00	1203,83
3,1	520800	0,00	85,31	85,31	578,67	1242,64
3,2	537600	0,00	86,77	86,77	597,33	1281,44
3,3	554400	0,00	88,20	88,20	616,00	1320,20
3,4	571200	0,00	89,61	89,61	634,67	1358,95
3,5	588000	0,00	91,00	91,00	653,33	1397,67
3,6	604800	0,00	92,37	92,37	672,00	1436,37
3,7	621600	0,00	93,72	93,72	690,67	1475,05
3,8	638400	0,00	95,05	95,05	709,33	1513,72
3,9	655200	0,00	96,36	96,36	728,00	1552,36
4,4	672000	0,00	97,65	97,65	746,67	1590,99
4,1	688800	0,00	98,93	98,93	765,33	1629,60
4,2	705600	0,00	100,19	100,19	784,00	1668,19
4,3	722400	0,00	101,44	101,44	802,67	1706,77
4,4	739200	0,00	102,67	102,67	821,33	1745,33
4,5	756000	0,00	103,88	103,88	840,00	1783,88
4,6	772800	0,00	105,08	105,08	858,67	1822,42
4,7	789600	0,00	106,27	106,27	877,33	1860,94
4,8	806400	4,43	107,44	111,87	896,00	1903,87
4,9	823200	12,52	108,61	121,13	914,67	1950,46
5,0	840000	23,00	109,75	132,76	933,33	1999,43

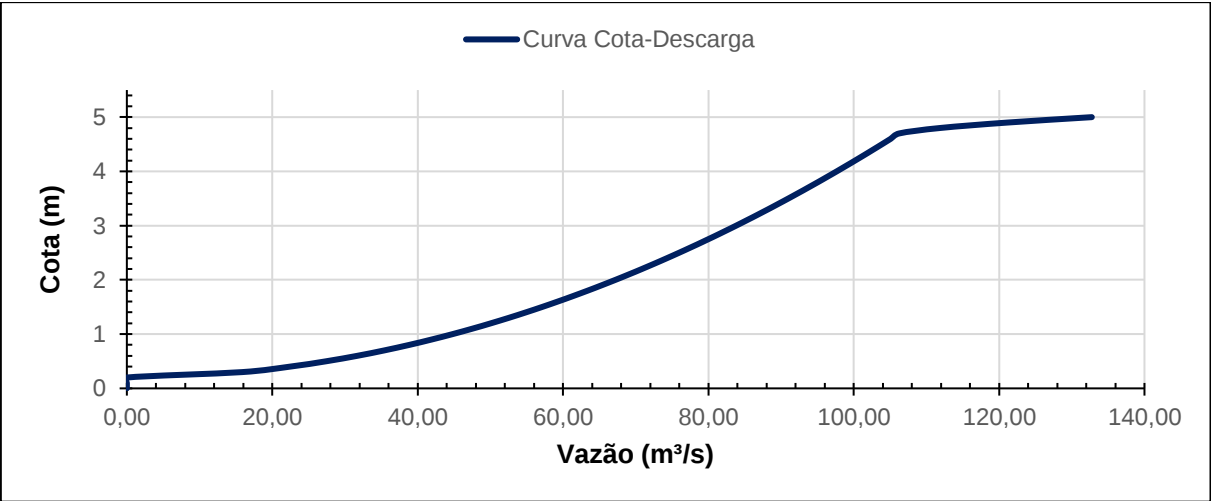
Fonte: elaboração própria (2024).

Gráfico 11 – Curva cota-volume obtida para a bacia de detenção



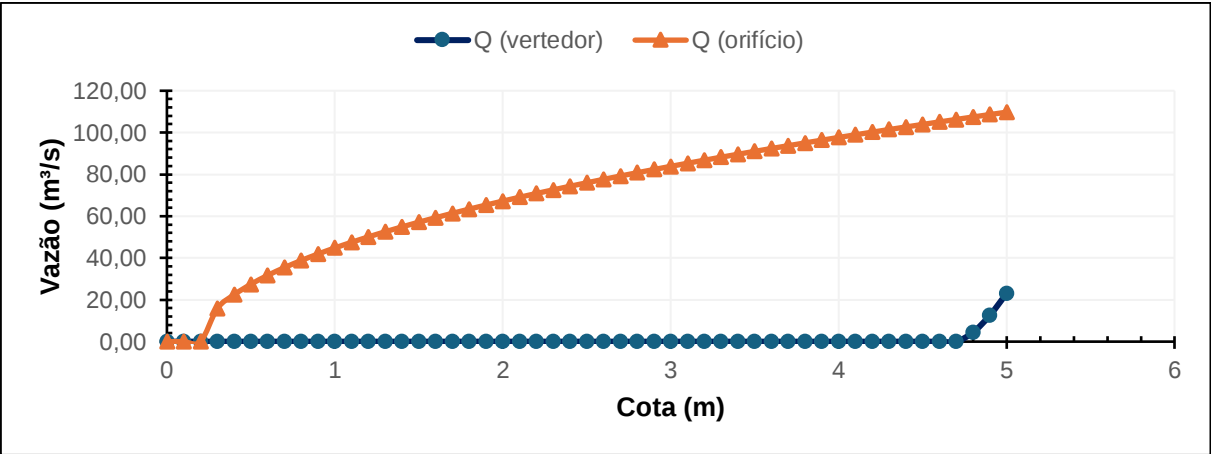
Fonte: elaboração própria (2024).

Gráfico 12 – Curva cota-descarga obtida para a bacia de detenção



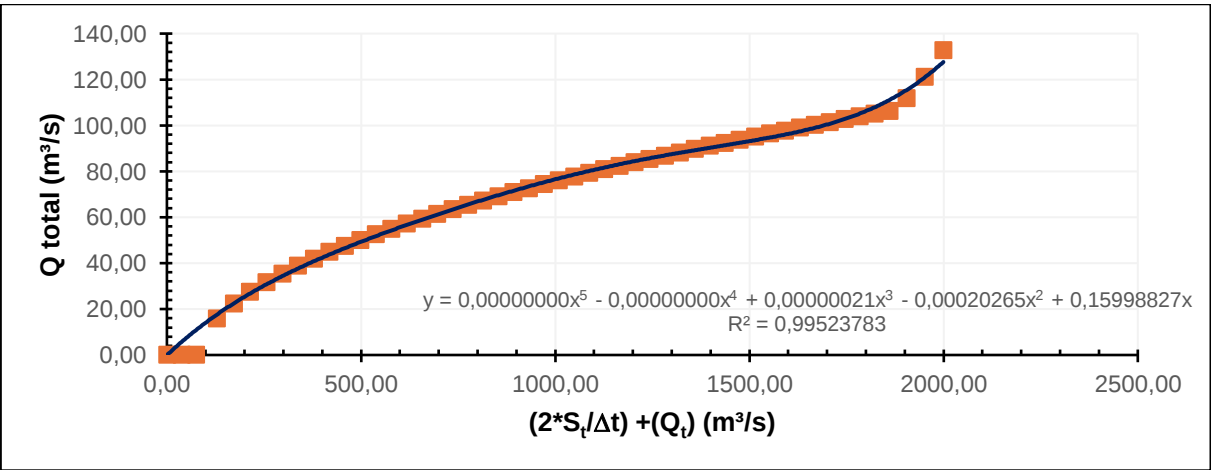
Fonte: elaboração própria (2024).

Gráfico 13 – Comportamento do vertedor x descarregador (orifício) de fundo da bacia de detenção



Fonte: elaboração própria (2024).

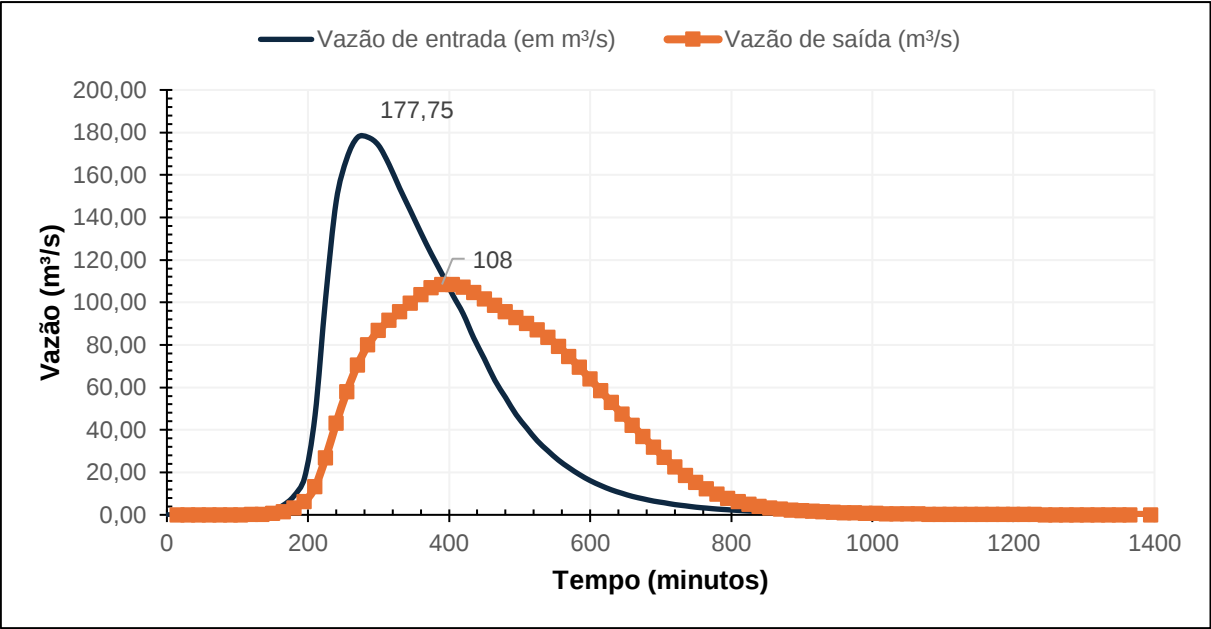
Gráfico 14 – Curva auxiliar função $Q = f\left(\left(2 \cdot \frac{S_t}{\Delta t}\right) + (Q_t)\right)$ obtida para a bacia de detenção



Fonte: elaboração própria (2024).

Foi utilizada a mesma discretização do hidrograma de entrada, nesse caso, 15 minutos, o Gráfico 15 exibe o resultado da vazão de entrada, e a vazão de saída após o reservatório.

Gráfico 15 – Hidrogramas de entrada e saída, após reservatório (bacia de detenção)



Fonte: elaboração própria (2024).

A Figura 34 exibe um resumo dos resultados obtidos no pré-dimensionamento do reservatório (bacia de detenção). A resolução do sistema para os diferentes passos de tempo, está exposta no APÊNDICE B.

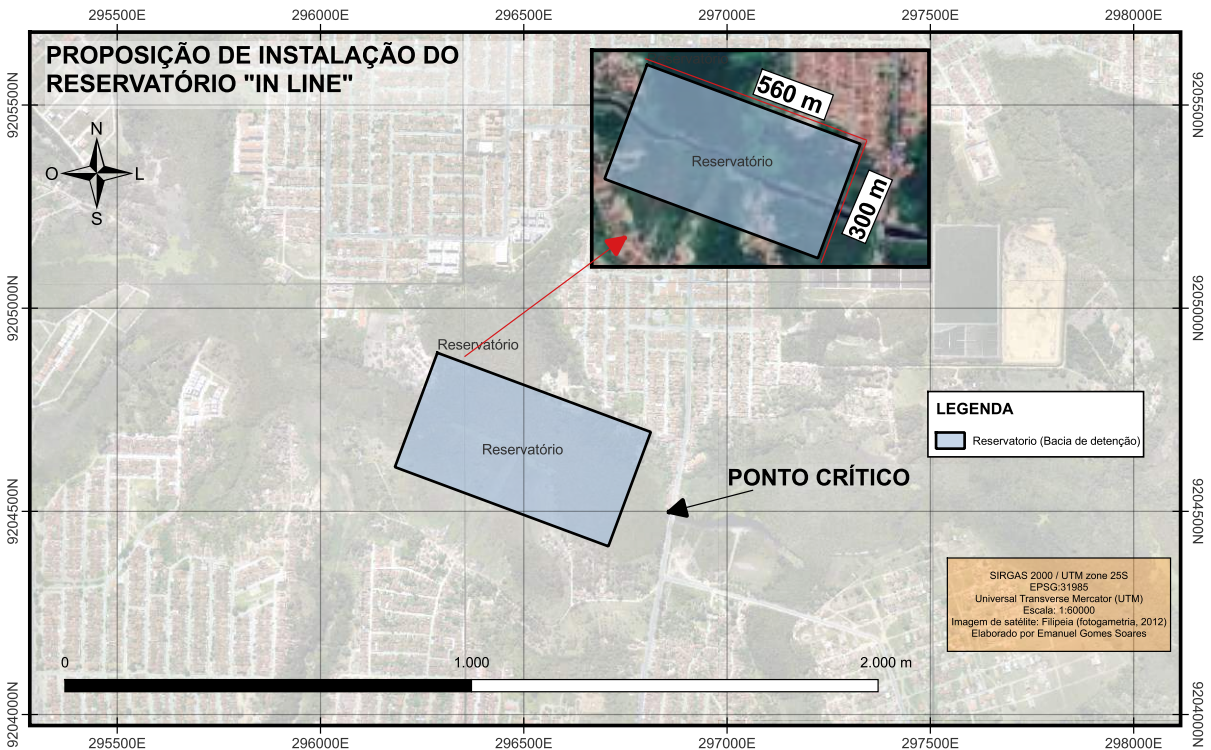
Figura 34 – Resultado da aplicação do método de Puls

Resumo do pré-dimensionamento				
Volume necessário do reservatório - determinado a partir dos hidrogramas entrada e saída				
776849,07	m³	Diferença entre métodos (%)		
Volume máximo do reservatório durante a simulação				
774668,62	m³	0,28%		
Altura máxima do nível d'água do reservatório durante a simulação				
4,61	m	Redução da vazão em (%)		
Vazão máxima de entrada				
177,75	m³/s	39%		
Vazão máxima de saída				
108,47	m³/s			
Relação $Q_{max,sai}/Q_{max,ent}$		VERTEDOR	ORIFÍCIO DE FUNDO	DIMENSÕES DO RESERVATÓRIO
0,61		Comprimento da soleira	Diametro	
Tempo de $Q_{max,ent}$		100,00 m	2,00 m	base
285,00	min	Coefficiente de descarga	Coefficiente de descarga	560,00 m
Tempo de $Q_{max,sai}$		1,40	0,60	largura
405,00	min	Cota de instalação	Cota de instalação	300,00 m
Defasagem entre $Q_{max,ent}$ e $Q_{max,sai}$		4,70 m	0,20 m	Área
120,00	min	Quantidade	Quantidade	168000,00 m²
		1,00 unid	6,00 unid	

Fonte: elaboração própria (2024).

Assim, pelos resultados obtidos, recomenda-se que o reservatório (bacia de retenção) deverá ser instalando na região antes da ponte (conforme sugerido no Mapa 14).

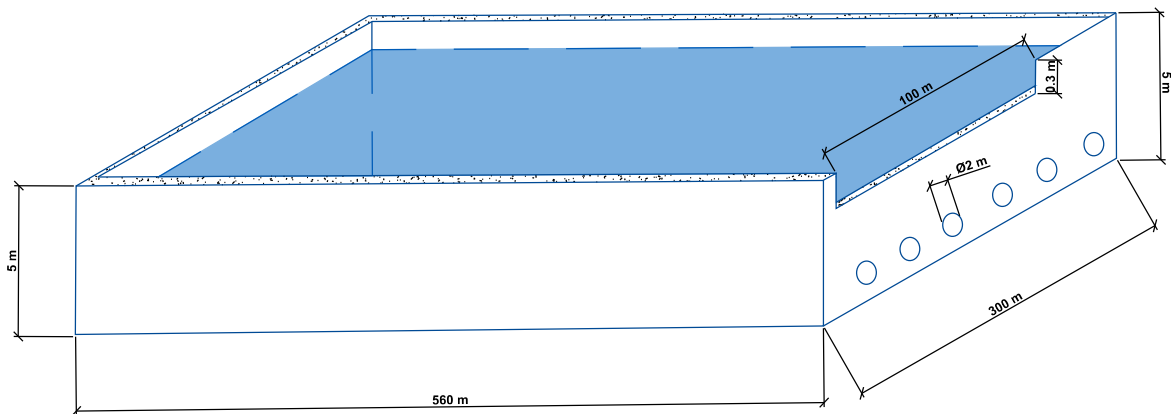
Mapa 14 – Local proposto para instalação do reservatório “on-line”



Fonte: elaboração própria (2024).

A Figura 35 exibe um esboço simplificado do reservatório.

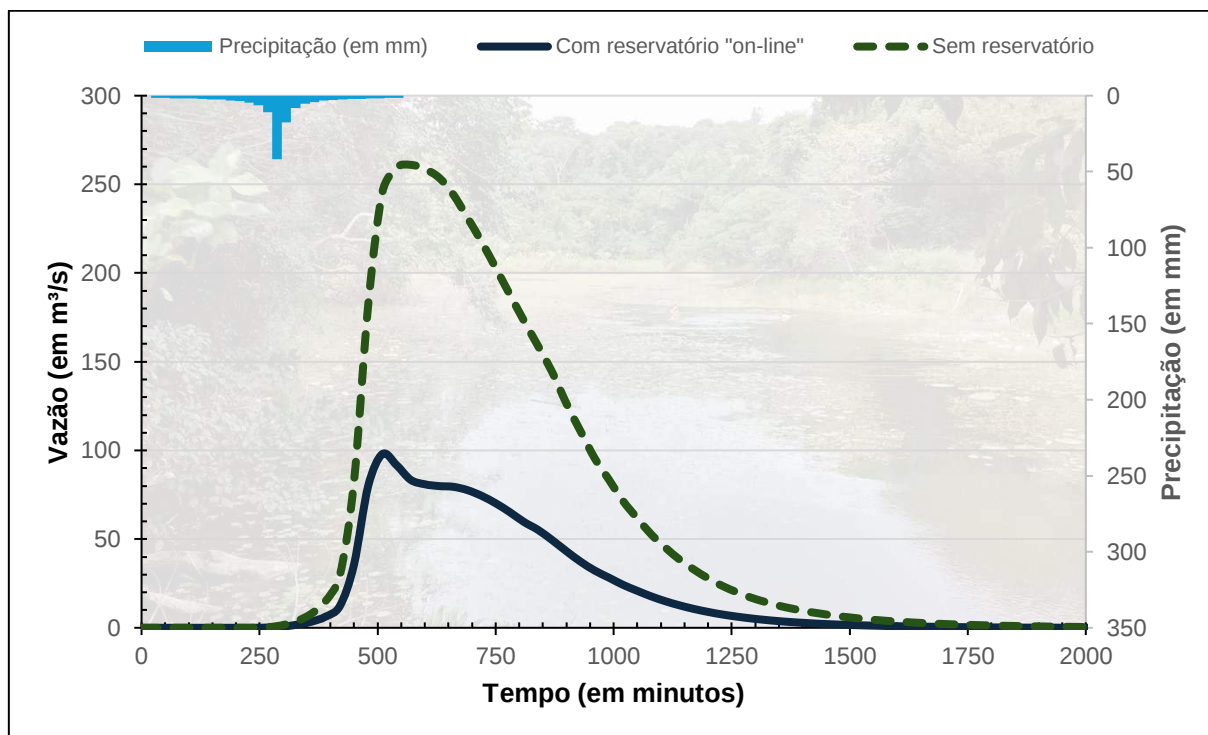
Figura 35 – Esboço (sem escala definida) do reservatório (bacia de retenção) pré-dimensionado



Fonte: elaboração própria (2024).

Como resultado da implantação da bacia de retenção é possível verificar uma redução na vazão a jusante do reservatório (Gráfico 15), que também se reflete no exutório final na sub-bacia hidrográfica 09, conforme o Gráfico 16.

Gráfico 16 – Hidrograma resultante no exutório da Bacia do Rio Cuiá após instalação do reservatório (bacia de retenção) do tipo “on-line”



Fonte: elaboração própria (2024).

Para o exutório final da bacia hidrográfica, a vazão é reduzida para 97,954 m³/s com a instalação do reservatório, representando uma redução de 164,9%. No ponto crítico, a vazão é reduzida para 108,47 m³/s com as dimensões adotadas, mantendo-se abaixo da vazão de referência do Cenário I e garantindo a segurança da estrutura. Isso representa uma redução de 39% na vazão de pico, os demais hidrogramas resultantes nos trechos a jusante do reservatório estão dispostos no APÊNDICE C.

Segundo Moura (2004) *apud* Baptista, Nascimento e Barraud (2011, p. 187), o custo de construção de um reservatório de concreto aberto no Brasil, em 2004, era de R\$ 35,69 por m³, com um custo anual de reconstituição de R\$ 0,16 por m³. Atualizando esses valores pela calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2024), o custo de implantação para outubro/2024 é de R\$ 138,97 por m³ e o custo anual de reconstituição é de aproximadamente R\$ 0,62 por m³. Portanto, para implementar

essa estrutura, é necessário um investimento mínimo de R\$ 107.870.907,60 e um custo anual de R\$ 481.254,68 para a reconstituição, sem considerar a inflação.

A implementação de bacias de retenção de grande porte, embora eficaz do ponto de vista da engenharia, pode ter um impacto ambiental elevado. No caso da bacia hidrográfica estudada, a área de 16,8 hectares necessária para a implementação torna esta solução inviável para a localidade, devido ao desmatamento que seria gerado. Uma alternativa mais sustentável seria instalar reservatórios menores em cada uma das sub-bacias hidrográficas a montante do ponto crítico. Essa abordagem minimiza o desmatamento e é mais adaptável ao crescimento urbano, embora caso haja um mal ajuste no *timing* dos hidrogramas de saída da bacia de retenção pode provocar o agravamento do problema conforme explica Canholi (2014, p. 72).

Entretanto, em bacias hidrográficas já urbanizadas, surgem diversas dificuldades na implementação dessas medidas. A falta de um planejamento urbano adequado complica ainda mais a implementação de medidas de controle na fonte. Como resultado, as soluções de macrodrenagem acabam sendo a melhor alternativa para retardar o escoamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Este estudo analisou os impactos da urbanização sobre as cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá, utilizando modelagem hidrológica para avaliar três cenários distintos de ocupação do solo, passado (2007), atual (2024) e futuro. A ausência de dados observados de vazão na região, mesmo com os frequentes eventos de inundações e cheias, evidencia a necessidade urgente de monitoramento fluviométrico na bacia hidrográfica, assim também não sendo possível obter a vazão de base que representa o fluxo contínuo de água na bacia hidrográfica, mesmo em períodos sem chuva, alimentado por fontes como nascentes, infiltração do solo e fluxo subterrâneo.

A urbanização aumentou consideravelmente o escoamento superficial, contribuindo para a ocorrência de cheias frequentes e intensas, conforme os resultados obtidos entre os Cenários I e II. Este fato reforça a necessidade de políticas públicas que regulem e fiscalizem o uso e ocupação do solo, e incentivem práticas

sustentáveis de desenvolvimento urbano, especialmente em áreas de constante expansão e especulação imobiliária, como neste caso.

O uso do *software* ABC 6 otimizou os cálculos dos hidrogramas de cheia e a propagação desses nos pontos de exutório. Isso permitiu analisar facilmente as vazões em diferentes cenários, ajustando os dados de entrada. É importante lembrar que o ABC 6, inicialmente desenvolvido para fins didáticos, passou a ser utilizado profissionalmente devido às facilidades de utilização da sua interface gráfica e dos seus métodos de cálculo, sendo empregado para estimar vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas urbanas e rurais sem dados de vazão, como no caso deste estudo.

Os resultados demonstraram que os impactos da urbanização afetam diretamente o escoamento superficial, evidenciados pelas vazões de pico e tempos de concentração no ponto crítico da ponte e no exutório da bacia hidrográfica. É importante destacar que o método adotado para determinar os tempos de concentração nas sub-bacias e na bacia hidrográfica foi baseado no uso e ocupação do solo. Este método tem sido utilizado em cidades como São Paulo e Porto Alegre no Brasil, uma vez que o município de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, até a data de conclusão deste estudo, não possuía um manual de drenagem específico que recomendasse uma metodologia adequada para estimar esse parâmetro.

Embora a implementação de uma bacia de retenção seja eficaz na redução dos picos de vazão e demonstre ser uma solução viável do ponto de vista estrutural e de engenharia para o controle de cheias, a necessidade de uma área de 16,8 hectares torna esta solução ambientalmente inviável para a localidade. Esses resultados sugerem que investimentos em infraestrutura de drenagem podem mitigar os impactos negativos da urbanização. Além disso, o uso de técnicas de drenagem compensatórias, ou a instalação de reservatórios menores em cada uma das sub-bacias hidrográficas que contribuem para o ponto crítico, podem ser alternativas eficazes para amenizar o problema.

Portanto, reforça-se a necessidade de um planejamento urbano adequado, que considere tanto a infraestrutura de drenagem quanto a preservação de áreas verdes para auxiliar na redução do escoamento superficial. A integração dessas práticas pode reduzir enormemente os riscos de cheias e os danos na região.

As vazões de projeto obtidas foram satisfatórias, simulando o impacto da urbanização, embora possam não refletir totalmente a realidade devido à falta de dados observados para comparação. Pelo menos, desde 2012, a região apresenta inundações recorrentes. A falta de dados dificulta a avaliação precisa da eficiência das medidas de controle, pois fatores como o tempo de concentração podem ser sub ou superestimados.

A alteração do solo original com a impermeabilização afeta diretamente o ciclo hidrológico, principalmente no ambiente urbano, aumentando o escoamento superficial ao impedir a infiltração. Embora este estudo proponha uma solução de macrodrenagem, essa pode se tornar ineficaz com a continuidade da urbanização intensiva. Portanto, é essencial explorar e implementar outras medidas, como controle de escoamento superficial na fonte, incentivos para criação de áreas permeáveis nos lotes, compensação de impermeabilização com infraestruturas verdes e, principalmente, a recuperação da vegetação próxima ao leito do rio e fiscalização das Áreas de Proteção Permanente (APPs). Medidas não-estruturais, como a educação ambiental sobre a disposição adequada dos resíduos sólidos, também são fundamentais. A preservação do meio ambiente é essencial para evitar desastres relacionados a fenômenos naturais, proteger os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade dos ecossistemas.

Recomenda-se para estudos futuros:

- Avaliar os danos causados pelas inundações e a população afetada na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá;
- Avaliar o uso de medidas compensatórias como as soluções baseadas na natureza (telhados verdes, jardins de chuva e pavimentos permeáveis) para redução do escoamento superficial na fonte na região da Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá;
- Avaliar as políticas públicas para gestão de recursos hídricos no município de João Pessoa;
- Analisar como a urbanização afeta a qualidade da água em rios urbanos e quais medidas podem ser implementadas para melhorar a qualidade da água no Rio Cuiá;

- Analisar como as mudanças climáticas estão afetando o município de João Pessoa e quais medidas podem ser implementadas para mitigar esses impactos;
- Realizar um estudo comparativo dos tempos de concentração utilizando diversas metodologias na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá.
- Projetar e avaliar sistemas de alerta que utilizem dados meteorológicos e hidrológicos para prever cheias e alertar a população em risco na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá.
- Elaborar mapas identificando pontos de alagamento e inundação na bacia hidrográfica.
- Coletar informações do leito do Rio Cuiá para modelagem hidráulica; e
- Elaborar um estudo de relação custo/benefício para obras de drenagem na região.

REFERÊNCIAS

A UNIÃO, J. Os efeitos da chuva forte na capital. **A União - Jonal, Editora e Gráfica**, 2022. Disponível em: <https://auniaio.pb.gov.br/noticias/caderno_paraiba/os-efeitos-da-chuva-forte-na-capital>. Acesso em: 20 jul. 2024.

AESA. AESA WebGIS. **SIG-PLANO**, 2021. Disponível em: <<https://www.aesa.pb.gov.br/sig-plano/index.html>>. Acesso em: 05 jul. 2024.

ANA. **Nota Técnica nº 46/2018/SPR**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Brasília, p. 13. 2018.

ARANDA, D. F. C. **Introduccion a la hidrología urbana**. 1ª. ed. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina, 2010. 300 p. ISBN 970-95118-1-5.

BAGAEEN, S. G.; LEHMAN, S. Review of The Principles of Green Urbanism: Transforming the City for Sustainability. **Urban Studies**, London, 50, abr. 2013. 3. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26144269>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Calculadora do cidadão. **Banco Central do Brasil**, 2024. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?met hod=exibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em: 26 set. 2024.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco - Junho de 2010**. Banco Mundial. Brasília, p. 71. 2012.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. D. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª Edição revisada. ed. Porto Alegre: ABRH, v. i, 2011. 318 p. ISBN 978-85-88686-31-1.

BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva**: Engenharia das Águas Pluviais nas Cidades. 1ª edição digital. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., v. I, 2018. 344 p. ISBN 978-85-212-1228-7. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212287/>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

BRASIL. **GLOSSÁRIO DE DEFESA CIVIL ESTUDOS DE RISCOS E MEDICINA DE DESASTRES**. 5ª edição. ed. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil - SEDEC, v. I, 2005. 191 p. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/glossario.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2024.

BRASIL. Lei Federal 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 10 Abril 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm>. Acesso em: 27 jun. 2024.

BRASIL. **Manual de saneamento / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – 5.ed. Brasília:** Funasa, 2019. 5ª. ed. Brasília: [s.n.], 2019. 545 p. ISBN 978-85-7346-060-5. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/506/Manual_de_Saneamento_Funasa_5a_Edicao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 jul. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 15 de julho de 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acesso em: 25 ago. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.750 de 12 de dezembro de 2023. Define os termos relacionados à prevenção de desastres e estabelece responsabilidades para diferentes níveis de governo. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 12 Dezembro 2023. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14750.htm#art2>. Acesso em: 01 jun. 2024.

BRASIL. Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas. **Ministério das Cidades**, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ap>>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BRASIL. Conheça a linha do tempo da tragédia de Mariana (MG). **Planalto**, 2024a. Disponível em: <<https://www.gov.br/planalto/pt-br/repactuacao-do-acordo-do-rio-doce/conheca-a-linha-do-tempo-da-tragedia-de-mariana-mg>>. Acesso em: 26 out. 2024.

BRITO, F.; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. F. L. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. **OSF**, 01 abr. 2018. 1-13. Disponível em: <<https://doi.org/10.31219/osf.io/84b92>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

CALIJURI, M. D. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental - Conceitos, Tecnologias e Gestão**. 2ª. ed. São Paulo: Elsevier Editora Ltda; Grupo GEN, v. I, 2019. 685 p. ISBN 978-85-352-9048-6. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595157446/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª Edição. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. I, 2014. ISBN 978-85-7975-181-3.

CEMADEN. Sala de Situação. **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/paginas/sala-de-situacao>>. Acesso em: 29 out. 2024.

CEMADEN. Pesquisadores brasileiros fazem recomendações, analisando as repentinas inundações e deslizamentos de terra em Recife (PE), após fortes chuvas ocorridas em maio de 2022. **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/pesquisadores-brasileiros-fazem-recomendacoes-analisando-as-repentinas-inundacoes-e>>.

deslizamentos-de-terra-em-recife-pe-apos-fortes-chuvas-ocorridas-em-maio-de-2022>. Acesso em: 27 mai. 2024.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2ª Impressão. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. I, 2015. 336 p. ISBN 978-85-8868-634-2. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=5&LIVRO=216&TITULO=hidrologia_para_engenharia_e_ciencias_ambientais>. Acesso em: 31 mai. 2024.

CORTESE, T. T. P.; NATALINI, G. **Mudanças Climáticas: Do Global ao Local**. 1ª. ed. Barueri: Editora Manole Ltda., v. I, 2014. 148 p. ISBN 978-85-204-4660-7. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520446607/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

CRICHTON, D. **The implications of climate change for the insurance industry: an update and outlook to 2020**. Climate Change, What can be done? Wilton Park: BRE. 2001. p. 12.

DEFESA CIVIL DO RIO GRANDE DO SUL. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 20/8. **Casa Militar Defesa Civil RS**, 2024. Disponível em: <<https://www.defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-10-7-66b67813ba21f-66c4eed627af9>>. Acesso em: 26 out. 2024.

EM-DAT. **The International Disaster Database**. Université Catholique de Louvain. Bruxelas, Bélgica. 2024.

FUNASA. DRENAGEM e MANEJO das ÁGUAS PLUVIAIS. **CADERNOS TEMÁTICOS SANEAMENTO BÁSICO**, Brasília, v. I, n. 1ª, p. 37, 2014. Disponível em: <<https://www.funasa.gov.br/documents/20182/300120/Drenagem+e+Manejo+das+%C3%81guas+Pluviais+Urbanas.pdf/72c03623-99ee-40d8-b1e8-107c182daf8e?version=1.0>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

G1. Em 2011, chuva na Região Serrana deixou mais de 900 mortos. **g1 - O portal de notícias da Globo**, 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/02/15/em-2011-chuva-na-regiao-serrana-deixou-mais-de-900-mortos.ghtml>>. Acesso em: 28 mai. 2024.

G1. Brumadinho: há 5 anos, 270 pessoas desapareciam sob lama de barragem da Vale; ninguém foi punido. **g1 - O portal de notícias da Globo**, 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2024/01/25/brumadinho-ha-5-anos-270-pessoas-desapareciam-sob-lama-de-barragem-da-vale-ninguem-foi-punido.ghtml>>. Acesso em: 26 out. 2024.

G1; PAPARAZZO, W. Veja imagens da chuva em João Pessoa. **g1 Paraíba**, maio 2012. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/fotos/2012/06/veja-imagens-da-chuva-em-joao-pessoa.html#F468540>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

G1; PAPARAZZO, W. Defesa Civil registra alagamentos em diversas regiões de João Pessoa. **g1 - O portal de notícias da Globo**, 2015. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2015/03/defesa-civil-registra-alagamentos-em-diversas-casas-de-joao-pessoa.html>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Manual de drenagem urbana - Região Metropolitana de Curitiba - PR**. Governo do Estado do Paraná. Curitiba, p. 150. 2002.

IBGE. CENSO Demográfico 1950/2010: população por situação de domicílio (população presente e residente). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE | Séries Históricas e Estatísticas**, 2022. Disponível em: <<https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=10&op=0&vcodigo=CD91&t=populacao-situacao-domicilio-populacao-presente-residente>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

IBGE. Censo 2022: População e Domicílios - Primeiros resultados. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2024. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

INSTITUTO CIDADES SUSTENTÁVEIS. DESENVOLVIMENTO URBANO E A MATRIZ AMBIENTAL. **Cidades Sustentáveis**, 2024. Disponível em: <https://www.cidadessustentaveis.org.br/institucional/planejamento-integrado_matriz-ambiental>. Acesso em: 31 mai. 2024.

IPH. **Manual de Drenagem Urbana**. VI. ed. Porto Alegre: [s.n.], v. VI, 2005. 167 p. Disponível em: <https://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manualdedrenagem.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2024.

JAVIDROOZI, V. et al. Smart, Sustainable, Green Cities: A State-of-the-Art Review. **Sustainability**, 17 mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su15065353>>. Acesso em: 26 out. 2024.

JOÃO PESSOA. Mapa da Evolução Histórica. **Filipeia - Unidade de Geotecnologia e Cadastro Municipal (UNIGEO) - DGEO /SEPLAN/ PMJP**, João Pessoa, 2024. Disponível em: <<https://filipeia.joaopessoa.pb.gov.br/mapashistoricos/index.html#15/-7.1235/-34.8810>>. Acesso em: 02 set. 2024.

JOÃO PESSOA, P. M. D. VOLUME I- PROJETO EXECUTIVO ESTUDOS HIDROLÓGICOS, MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **João Pessoa Sustentável**, João Pessoa, p. 121, 2021. Disponível em: <<https://jpsustentavel.joaopessoa.pb.gov.br/wp-content/uploads/2023/05/Projeto-Executivo-Estudos-Hidrologicos-Mudancas-Climaticas.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2024.

LABSID. ABC. **Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões**, s.d. Disponível em: <<https://labsid.poli.usp.br/software/abc/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

LIMA, C. S. P.; COLEN, A. G. N. SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL. **Revista Multidebates**, Palmas, 6, n. 2ª, 08 dez. 2022. 11. Disponível em: <<http://revista.faculdadeitop.edu.br/index.php/revista/article/view/532>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

MAPBIOMAS. CÓDIGOS DA LEGENDA – COLEÇÃO 5. **MapBiomas Brasil**, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/wp->

content/uploads/sites/4/2023/08/EN__Codigos_da_legenda_Colecao_5.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MDR. **Carta Brasileira Cidades Inteligentes - Versão resumida**. Brasília: Editora Livraria da Física, 2021. 48 p. ISBN 978-65-5563-142-5. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/desenvolvimento-urbano-e-metropolitano/projeto-andus/carta-brasileira-para-cidades-inteligentes>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

MENDONÇA, F.; MONTEIRO, C. A. D. F. **Clima urbano**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Contexto, v. I, 2022. 194 p. ISBN 978-85-7244-239-8. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788572442398/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

MIDR. Como se organiza a Defesa Civil no Brasil. **Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional**, 22 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sinpdec/como-se-organiza>>. Acesso em: 01 jun. 2024.

MIGUEZ, M. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, v. I, 2017. 340 p. ISBN 9788595153240. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153240/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2015. 361 p. ISBN 978-85-352-7746-3. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155695/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

NAÇÕES UNIDAS. ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050. **ONU News - Perspectiva Global Reportagens Humanas**, 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 26 mai. 2024.

NOTIBRAS. REGIÃO SUL MANTÉM ALERTA PARA INUNDAÇÕES. **Notibras**, 2020. Disponível em: <<https://www.notibras.com/site/regiao-sul-mantem-alerta-para-inundacoes/>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

OLIVEIRA, C. D. P. M. et al. ABC 6, UM SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES PARA ANÁLISE DE CHEIAS EM BACIAS. **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 1999. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9620>>. Acesso em: 13 jul. 2024.

OPENTOPOGRAPHY. Getting Started. **OpenTopography**, 2024. Disponível em: <<https://opentopography.org/start>>. Acesso em: 07 jun. 2024.

PIMENTEL, L. **Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, v. I, 2015. 330 p. ISBN 978-85-352-8047-0. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155510/>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

PLANET. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. **Planet Explorer**, 2024. Disponível em: <<https://www.planet.com/>>. Acesso em: 08 ago. 2024. Licenciado sob a licença "Education and Research Standard".

PORTAL CORREIO. Acessos Valentina-Centro sempre alagam e deixam moradores ilhados. **Portal Correio**, 2019. Disponível em: <<https://portalcorreio.com.br/acessos-valentina-centro-sempre-alagam-e-deixam-moradores-ilhados/>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

QGIS. Descubra o QGIS. **QGIS**, 2024. Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html>. Acesso em: 07 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL. 18h40: Com mais uma morte, Defesa Civil divulga novo balanço sobre chuvas e enchentes no RS. **Governo do Estado do Rio Grande do Sul**, 2023. Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/18h40-com-mais-uma-morte-defesa-civil-divulga-novo-balanco-sobre-chuvas-e-enchentes-no-rs>>. Acesso em: 26 out. 2024.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas**. Tradução de Alexandre Salvaterra. 1ª. ed. Porto Alegre: BOOKMAN® COMPANHIA EDITORA, 2009. 379 p. ISBN 978-85-7780-490-0. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577804900/>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

S2ID. Atlas Digital de desastres no Brasil. **Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres**, 2024. Disponível em: <<http://atlasdigital.mdr.gov.br/>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

SÃO PAULO, P. D. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos**. 1ª. ed. São Paulo: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano, v. II, 2012. 220 p. ISBN 978-85-66381-02-3. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v2.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2024.

SARTORI, A. Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**, Campinas, Fev. 2004. 189. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=466016>>. Acesso em: 03 ago. 2024.

SENTINEL HUB. Sentinel Hub EO Browser. **Sentinel Hub EO Browser**, 2024. Disponível em: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?kc_idp_hint=planet-account-link>. Acesso em: 28 ago. 2024.

SGB/CPRM. Processos hídricos - Teoria e conceitos - Módulo 3. **PERCEPÇÃO E MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO**, 2023. Disponível em: <<https://mooc41.escolavirtual.gov.br/course/view.php?id=5428>>. Acesso em: 15 mai. 2024.

SNIRH. Histórico de Dados Pluviométricos. **HidroWeb**, 2005. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SOUZA, C. L.; AWAD, J. D. C. M. **Cidades sustentáveis cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano**. 1ª. ed. Porto Alegre: Grupo A Educação S.A., v. I, 2009. 269 p. ISBN 978-85-407-0185-4. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788540701854/>>. Acesso em: 31 mai. 2024.

STEIN, R. T. et al. **Hidrologia e drenagem**. 1ª. ed. Porto Alegre: SAGAH EDUCAÇÃO S.A., v. I, 2021. 188 p. ISBN 978-65-5690-276-0. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902760/>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

TREBY, E. J.; CLARK, M. J.; PRIEST, S. J. Confronting flood risk: Implications for insurance and risk transfer. **Journal of Environmental Management**, 81, n. 4ª, 01 dez. 2006. 351-359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705003610>>. Acesso em: 02 jun. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Edição. ed. Porto Alegre: ABRH, v. IV, 2001. 935 p. ISBN 85-7025-298-6.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, 55, n. 4, Out. 2003. 2. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 29 mai. 2024.

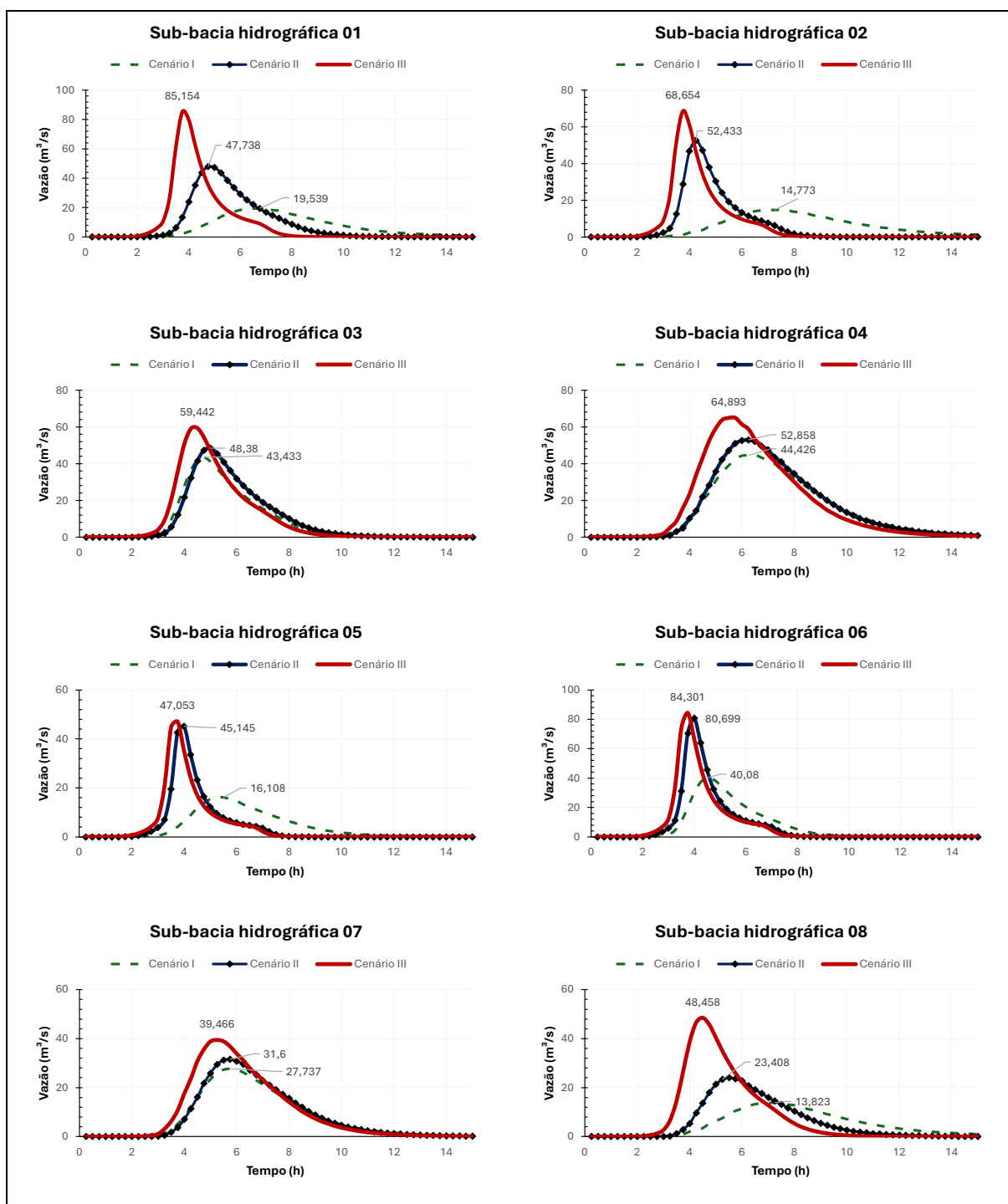
TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. 1ª. ed. Porto Alegre: ABRH, v. 11, 2007. 393 p. ISBN 978-85-88686-21-2.

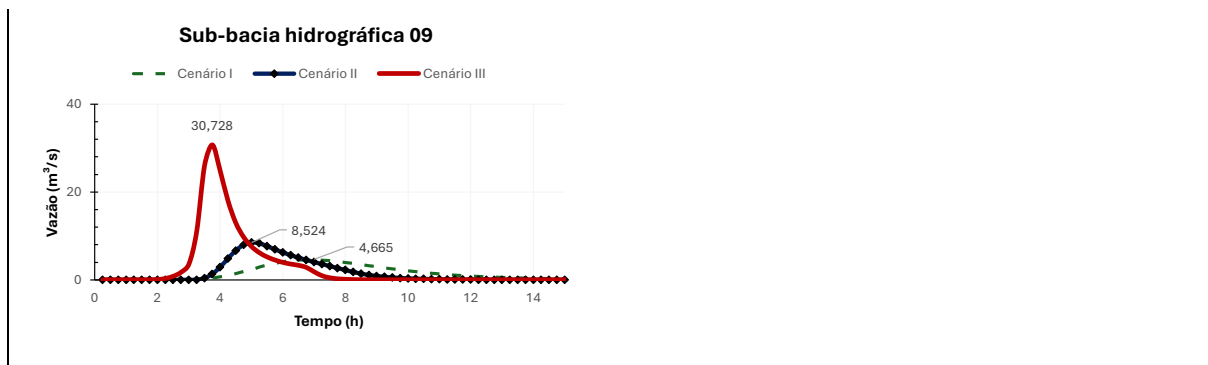
TV CABO BRANCO. Ladeira entre Mangabeira e Valentina está intransitável. **GloboPlay**, 2024. Disponível em: <<https://globoplay.globo.com/v/12631981/>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

WOLFF, D. B. et al. Resíduos sólidos em um sistema de drenagem urbana no município de Santa Maria (RS). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 21, jan. 2016. 151-158. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100132089>>. Acesso em: 26 out. 2024.

APÊNDICE A - Hidrogramas de cheias obtidos para cada uma das sub-bacias hidrográficas nos três cenários de estudo

Figura A-1 – Hidrogramas de cheias obtidos para cada uma das sub-bacias hidrográficas nos três cenários estudados





Fonte: elaboração própria (2024).

APÊNDICE B - Passos de cálculo do pré-dimensionamento da bacia de detenção

Tabela B-1 - Passos de cálculo do pré-dimensionamento da bacia de detenção pelo método de Puls

i	Δt min	I_t	Q_t	S_t	$\left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	$I_t + I_{t+1}$	$(I_t + I_{t+1}) + \left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	Q_{t+1}	S_{t+1}	h	$(I_t - Q_t)$
1	15	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
2	30	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	45	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
4	60	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
5	75	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
6	90	0,00	0,00	0	0	0	0,03	0,00	11	0,00	0,00
7	105	0,03	0,00	11	0	0	0,28	0,04	105	0,00	0,02
8	120	0,23	0,04	105	0	1	1,26	0,20	476	0,00	0,19
9	135	0,84	0,20	476	1	3	3,83	0,61	1448	0,01	0,64
10	150	2,13	0,61	1448	3	7	9,28	1,47	3515	0,02	1,52
11	165	4,54	1,47	3515	6	13	19,73	3,08	7492	0,04	3,07
12	180	8,85	3,08	7492	14	26	39,71	6,05	15147	0,09	5,77
13	195	17,29	6,05	15147	28	64	91,68	13,12	35352	0,21	11,24
14	210	46,78	13,12	35352	65	149	214,09	26,82	84271	0,50	33,65
15	225	101,88	26,82	84271	160	249	409,85	43,15	165013	0,98	75,05
16	240	147,53	43,15	165013	324	315	638,76	57,92	261379	1,56	104,37
17	255	167,69	57,92	261379	523	345	868,20	70,35	359030	2,14	109,77
18	270	177,58	70,35	359030	727	355	1082,82	79,98	451279	2,69	107,23
19	285	177,75	79,98	451279	923	352	1274,53	86,71	534519	3,18	97,77
20	300	173,91	86,71	534519	1101	339	1439,88	91,45	606793	3,61	87,21
21	315	164,86	91,45	606793	1257	319	1575,55	95,47	666037	3,96	73,40
22	330	153,72	95,47	666037	1385	297	1681,66	99,53	711959	4,24	58,25
23	345	143,33	99,53	711959	1483	276	1758,71	103,54	744829	4,43	43,80
24	360	132,78	103,54	744829	1552	256	1807,16	106,74	765189	4,55	29,24
25	375	122,74	106,74	765189	1594	236	1829,83	108,46	774619	4,61	16,00
26	390	113,41	108,46	774619	1613	217	1829,95	108,47	774669	4,61	4,96
27	405	103,62	108,47	774669	1613	198	1811,29	107,04	766912	4,56	0,00
28	420	94,65	107,04	766912	1597	178	1775,10	104,55	751748	4,47	0,00
29	435	83,25	104,55	751748	1566	157	1722,70	101,52	729531	4,34	0,00
30	450	73,46	101,52	729531	1520	137	1656,38	98,44	701072	4,17	0,00
31	465	63,26	98,44	701072	1459	119	1578,03	95,55	667118	3,97	0,00
32	480	55,27	95,55	667118	1387	102	1489,43	92,85	628460	3,74	0,00
33	495	47,22	92,85	628460	1304	88	1391,86	90,12	585784	3,49	0,00
34	510	40,92	90,12	585784	1212	76	1287,42	87,10	540144	3,22	0,00
35	525	34,88	87,10	540144	1113	65	1178,27	83,54	492627	2,93	0,00
36	540	30,17	83,54	492627	1011	56	1067,13	79,35	444503	2,65	0,00
37	555	25,78	79,35	444503	908	48	956,40	74,57	396827	2,36	0,00
38	570	22,19	74,57	396827	807	41	848,39	69,36	350563	2,09	0,00
39	585	18,93	69,36	350563	710	35	744,72	63,91	306363	1,82	0,00
40	600	16,12	63,91	306363	617	30	646,83	58,39	264799	1,58	0,00

i	Δt min	I_t	Q_t	S_t	$\left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	$I_t + I_{t+1}$	$(I_t + I_{t+1}) + \left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	Q_{t+1}	S_{t+1}	h	$(I_t - Q_t)$
41	615	13,82	58,39	264799	530	26	555,65	52,89	226238	1,35	0,00
42	630	11,78	52,89	226238	450	22	471,80	47,47	190952	1,14	0,00
43	645	10,17	47,47	190952	377	19	395,71	42,13	159114	0,95	0,00
44	660	8,68	42,13	159114	311	16	327,69	36,90	130855	0,78	0,00
45	675	7,55	36,90	130855	254	14	267,92	31,85	106231	0,63	0,00
46	690	6,48	31,85	106231	204	12	216,40	27,05	85206	0,51	0,00
47	705	5,70	27,05	85206	162	11	172,84	22,60	67607	0,40	0,00
48	720	4,84	22,60	67607	128	9	136,73	18,59	53161	0,32	0,00
49	735	4,25	18,59	53161	100	8	107,40	15,10	41538	0,25	0,00
50	750	3,61	15,10	41538	77	7	83,98	12,13	32335	0,19	0,00
51	765	3,17	12,13	32335	60	6	65,63	9,68	25173	0,15	0,00
52	780	2,73	9,68	25173	46	5	51,40	7,72	19656	0,12	0,00
53	795	2,41	7,72	19656	36	4	40,45	6,15	15434	0,09	0,00
54	810	2,08	6,15	15434	28	4	32,04	4,92	12200	0,07	0,00
55	825	1,82	4,92	12200	22	3	25,59	3,97	9733	0,06	0,00
56	840	1,59	3,97	9733	18	3	20,66	3,22	7846	0,05	0,00
57	855	1,40	3,22	7846	14	3	16,85	2,64	6395	0,04	0,00
58	870	1,23	2,64	6395	12	2	13,88	2,18	5264	0,03	0,00
59	885	1,08	2,18	5264	10	2	11,54	1,82	4373	0,03	0,00
60	900	0,95	1,82	4373	8	2	9,66	1,53	3660	0,02	0,00
61	915	0,82	1,53	3660	7	2	8,14	1,29	3085	0,02	0,00
62	930	0,72	1,29	3085	6	1	6,91	1,10	2615	0,02	0,00
63	945	0,62	1,10	2615	5	1	5,89	0,93	2228	0,01	0,00
64	960	0,55	0,93	2228	4	1	5,03	0,80	1902	0,01	0,00
65	975	0,46	0,80	1902	3	1	4,29	0,68	1625	0,01	0,00
66	990	0,40	0,68	1625	3	1	3,67	0,59	1390	0,01	0,00
67	1005	0,34	0,59	1390	3	1	3,15	0,50	1191	0,01	0,00
68	1020	0,30	0,50	1191	2	1	2,69	0,43	1019	0,01	0,00
69	1035	0,25	0,43	1019	2	0	2,29	0,37	867	0,01	0,00
70	1050	0,21	0,37	867	2	0	1,91	0,31	724	0,00	0,00
71	1065	0,14	0,31	724	1	0	1,55	0,25	586	0,00	0,00
72	1080	0,10	0,25	586	1	0	1,24	0,20	469	0,00	0,00
73	1095	0,08	0,20	469	1	0	0,99	0,16	373	0,00	0,00
74	1110	0,06	0,16	373	1	0	0,78	0,13	296	0,00	0,00
75	1125	0,05	0,13	296	1	0	0,62	0,10	235	0,00	0,00
76	1140	0,04	0,10	235	0	0	0,49	0,08	185	0,00	0,00
77	1155	0,03	0,08	185	0	0	0,38	0,06	145	0,00	0,00
78	1170	0,02	0,06	145	0	0	0,30	0,05	113	0,00	0,00
79	1185	0,02	0,05	113	0	0	0,23	0,04	87	0,00	0,00
80	1200	0,01	0,04	87	0	0	0,18	0,03	66	0,00	0,00
81	1215	0,01	0,03	66	0	0	0,13	0,02	50	0,00	0,00
82	1230	0,00	0,02	50	0	0	0,10	0,02	36	0,00	0,00
83	1245	0,00	0,02	36	0	0	0,07	0,01	25	0,00	0,00
84	1260	0,00	0,01	25	0	0	0,05	0,01	17	0,00	0,00

i	Δt min	I_t	Q_t	S_t	$\left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	$I_t + I_{t+1}$	$(I_t + I_{t+1}) + \left(\frac{2 \cdot S_t}{\Delta t}\right) - Q_t$	Q_{t+1}	S_{t+1}	h	$(I_t - Q_t)$
85	1275	0,00	0,01	17	0	0	0,03	0,00	12	0,00	0,00
86	1290	0,00	0,00	12	0	0	0,02	0,00	8	0,00	0,00
87	1305	0,00	0,00	8	0	0	0,01	0,00	5	0,00	0,00
88	1320	0,00	0,00	5	0	0	0,01	0,00	4	0,00	0,00
89	1335	0,00	0,00	4	0	0	0,01	0,00	3	0,00	0,00
90	1350	0,00	0,00	3	0	0	0,00	0,00	2	0,00	0,00
91	1365	0,00	0,00	2	0	0	0,00	0,00	1	0,00	0,00
92	1395	0,00	0,00	1	0	0	0,00	0,00	1	0,00	0,00
93	1425	0,00	0,00	1	0	0	0,00	0,00	1	0,00	0,00
94	1455	0,00	0,00	1	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
95	1485	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
96	1515	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
97	1545	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
98	1575	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
99	1605	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
100	1635	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
101	1665	0,00	0,00	0	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

* A altura é dada pela equação: $h = \frac{S_{t+1}}{\Delta t}$.

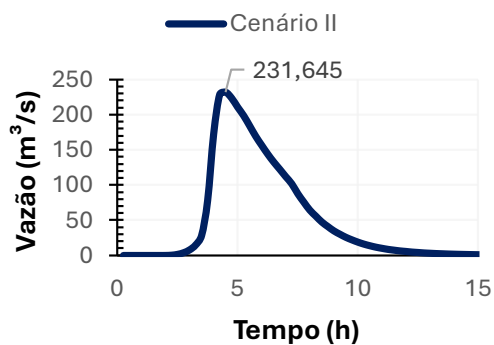
Fonte: elaboração própria (2024).

APÊNDICE C - Comparação das vazões nas condições sem e com bacia de retenção a jusante do exutório 05

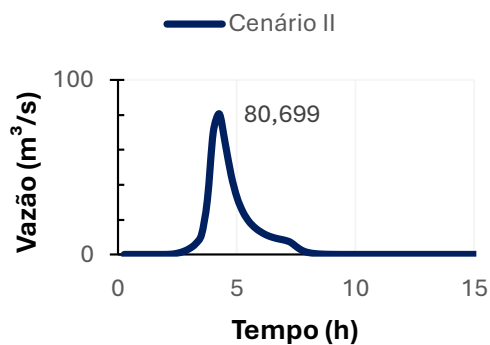
Figura C-1 – Comparação das vazões nas condições: sem e com bacia de retenção a jusante do exutório 05 (ponto crítico)

Exutório 06

Sem bacia de retenção

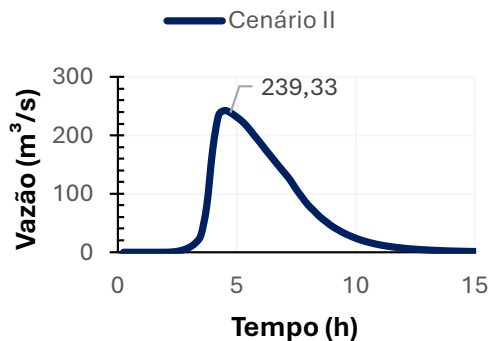


Com bacia de retenção

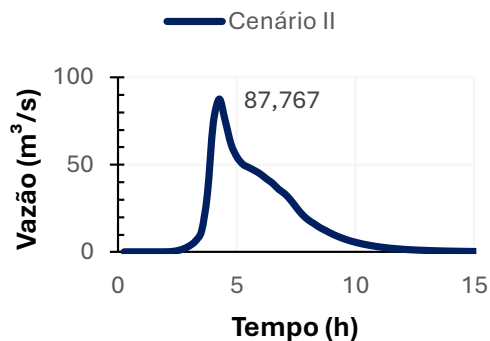


Exutório 07

Sem bacia de retenção

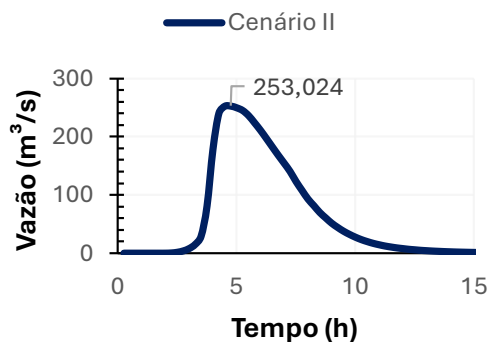


Com bacia de retenção

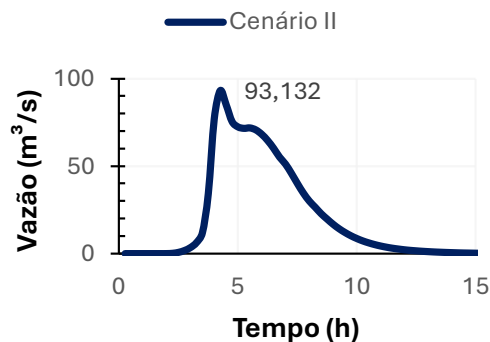


Exutório 08

Sem bacia de retenção

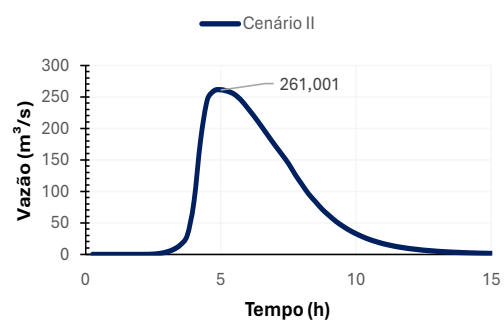


Com bacia de retenção

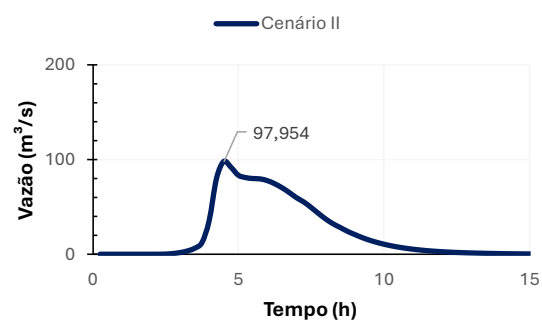


Exutório 09

Sem bacia de detenção



Com bacia de detenção



Fonte: elaboração própria (2024).

APÊNDICE D - Resumo dos dados de entrada utilizados no *software* ABC 6

Tabela D-1 – Dados de entrada utilizados na aba “Dados da bacia” no *software* ABC 6 para os 3 cenários, parte I

Sub-bacia hidrográfica	Características físicas	Tempo de concentração (em horas)		
	Área (km²)	Cenário I	Cenário II	Cenário III
01	5,33	4,83	2,07	0,96
02	4,10	5,80	1,18	0,90
03	5,76	2,20	2,20	1,80
04	10,10	4,48	3,97	3,47
05	2,49	3,20	0,70	0,70
06	4,67	1,99	0,76	0,76
07	5,88	3,61	3,25	3,03
08	4,97	5,47	2,93	1,91
09	1,91	4,98	2,17	0,77

Fonte: elaboração própria (2024).

Tabela D-2 – Dados de entrada utilizados na aba “Dados da bacia” no *software* ABC 6 para os 3 cenários, parte II

Sub-bacia hidrográfica	Dados do canal		
	Comprimento (m)	Velocidade (m/s)	Tempo de trânsito da onda de cheia (em horas)
01	1783,82	1,27	0,33
02	1103,85	2,71	0,11
03	2048,18	2,33	0,24
04	6429,21	1,22	1,46
05	2108,06	2,02	0,29
06	1787,76	2,07	0,24
07	4850,77	1,27	1,06
08	1977,78	0,69	0,80
09	811,33	1,28	0,18

Fonte: elaboração própria (2024).

Os dados da aba infiltração estão dispostos na **Tabela 11** – Valores adotados para o CN, em cada uma das sub-bacias hidrográficas nos cenários de estudo.