



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA CLARA CANDIDO DE LIMA

MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE
MANCHA DE INUNDAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO
HIPOTÉTICO NO MUNICÍPIO DE PAUDALHO

RECIFE

2024

MARIA CLARA CANDIDO DE LIMA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE MANCHA DE
INUNDAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO NO MUNICÍPIO DE
PAUDALHO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientador: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Coorientadora: Arivânia Bandeira Rodrigues

RECIFE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Maria Clara Candido de.

Modelagem hidrológica para mapeamento de mancha de inundação: um estudo de caso hipotético no município de Paudalho / Maria Clara Candido de Lima. - Recife, 2024.

92 : il., tab.

Orientador(a): Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Coorientador(a): Arivânia Bandeira Rodrigues

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Inundação. 2. SCS. 3. HEC-HMS. 4. HEC-RAS. 5. Mapeamento. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. (Orientação). II. Rodrigues, Arivânia Bandeira. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: – Maria Clara Candido de Lima

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Coorientador: Arivânia Bandeira Rodrigues

Examinador 1: Alfredo Ribeiro Neto

Examinador 2: Vanine Elane Menezes de Farias

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Modelagem hidrológica para mapeamento de mancha de inundação: Um estudo de caso hipotético no município de Paudalho

LOCAL: Sala do Laboratório de Geoprocessamento

DATA: 12/12/2024 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 15:00 horas.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com **NOTA: 9,0 (nove)**.

1) (x) aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 12 de dezembro de 2024

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato:

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.” – José de Alencar

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado e sustentado ao longo desta caminhada. Sem Sua luz, força e proteção, essa conquista não seria possível.

Aos meus pais, Marcelo e Geane meu mais profundo agradecimento por serem meu porto seguro e acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu duvidava de mim mesma. O amor e apoio que recebi de vocês são imensuráveis.

Aos meus irmãos, agradeço por estarem sempre ao meu lado em cada etapa. Seu incentivo, carinho e apoio incondicional tornaram os momentos difíceis mais leves e as vitórias ainda mais gratificantes.

Aos meus avós, em especial ao meu avô Manoel Teixeira (in memoriam), a quem carrego a memória com muito carinho. Sei que, se estivesse presente, estaria profundamente orgulhoso de ver até onde cheguei. E ao meu avô Antônio Cândido, fonte de sabedoria, perseverança e exemplo de vida.

Aos meus tios e tias, em especial às minhas tias Edjane e Edvânia Candido meu sincero agradecimento pelo carinho e incentivo ao longo desta caminhada. Cada conversa, conselho e gesto de apoio foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Obrigada por acreditarem em mim e estarem presentes em todos os momentos.

Aos demais familiares, agradeço imensamente pelo carinho, apoio e compreensão durante essa jornada. As palavras de incentivo e o suporte em momentos desafiadores foram essenciais para que eu concluísse essa etapa.

Aos meus orientadores, professor Dr. Anderson Paiva e M. Arivânia Bandeira, expresso minha profunda gratidão pela paciência e dedicação com que me nortearam ao longo desta jornada. Seus ensinamentos e orientações foram essenciais para que eu superasse os desafios e finalizasse este trabalho com êxito. Agradeço por compartilharem seu conhecimento e por acreditarem em mim.

A todos os meus amigos, em especial Gabriel e Raquel, minha mais profunda gratidão. Vocês foram uma fonte constante de apoio, alegria e encorajamento ao longo de toda a jornada. Obrigada pelas conversas que acalmaram e pelas risadas que aliviaram os dias difíceis.

Aos amigos e companheiros na universidade, sou grata por compartilharem desafios, vitórias e longas noites de estudo. A amizade e o apoio de vocês foram fundamentais para superar os obstáculos e conquistar meus objetivos.

Ao meu amigo Gabriel Tibérius, presente valioso da universidade, que tornou essa fase mais rica com sua amizade, meu sincero agradecimento. Obrigada por todo o apoio.

Não poderia deixar de mencionar os profissionais da hidrologia que tanto admiro: Vitor Barbosa, pelo apoio, incentivo e ensinamentos, e Ricardo Reis, a quem sou imensamente grata pelo compartilhamento de conhecimento e experiências, bem como pelo apoio e incentivo ao meu crescimento profissional.

Agradeço também a Kássio Kramer, Gerente do setor de Monitoramento de Recursos Hídricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima – Apac, pelo interesse e prontidão em ajudar este trabalho, tornando-se um apoio importante para a obtenção e disponibilização de dados das barragens.

Por fim, este trabalho é um reflexo do apoio e da inspiração que recebi ao longo do caminho. A todos que estiveram ao meu lado, meu sincero agradecimento. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

RESUMO

Desastres naturais, como inundações, têm se tornado mais frequentes no Brasil, especialmente em áreas urbanas e ribeirinhas, devido à impermeabilização do solo e à ocupação inadequada de áreas de várzeas e planícies de inundação. Essas áreas, naturalmente propensas a transbordamentos, apresentam riscos elevados para populações vulneráveis. Nesse contexto, as barragens se destacam como importantes medidas estruturais de controle de cheias, desempenhando um papel crucial na mitigação de inundações e na regularização das vazões dos rios. Entretanto, quando próximas da sua capacidade máxima, podem liberar grandes volumes de água, agravando os impactos para comunidades ribeirinhas, como ocorrido em 2011 no estado de Pernambuco, quando a barragem de Carpina liberou de 350 m³/s para o rio Capibaribe, após fortes chuvas. Diante disso, este estudo tem como objetivo mapear as manchas de inundação no município de Paudalho-PE, considerando cenários de operação hipotéticos da barragem associados a eventos pluviométricos. Para isso, foram utilizadas equações IDF para estimar chuvas médias, considerando a área de influência de cada equação por meio do método do Polígono de Thiessen. Os tempos de retorno avaliados foram de 10, 50 e 100 anos, com a distribuição temporal das chuvas baseada no método de Huff (1967). O modelo hidrológico foi desenvolvido no HEC-HMS utilizando o método SCS (Soil Conservation Service), enquanto o modelo hidráulico implementado no HEC-RAS. Ambos os modelos utilizaram dados topográficos do levantamento a laser do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). As simulações revelaram vazões de pico de 359,4 m³/s, 933,5 m³/s e 1745,6 m³/s, conforme os cenários analisados. Esses valores resultaram em áreas de inundação de 1,49 km², 4,50 km² e 6,10 km², com cotas de alagamento de 67,11 m, 70,40 m e 73,43 m, respectivamente. Além disso, foi possível avaliar os impactos sobre áreas edificadas, abrangendo infraestruturas urbanas como a delegacia, o pátio de eventos e a prefeitura.

Palavras-chave: Inundação. SCS. HEC-HMS. HEC-RAS. Mapeamento.

ABSTRACT

Natural disasters, such as floods, have become increasingly frequent in Brazil, especially in urban and riverside areas. This phenomenon is primarily driven by soil impermeabilization and the improper occupation of floodplains and wetlands, which are naturally prone to overflows and pose significant risks to vulnerable populations. In this context, dams play a vital role as structural measures for flood control, contributing to mitigating floods and regulating river flows. However, when operating near their maximum capacity, they may release large volumes of water, intensifying impacts on riverside communities. An example of this occurred in 2011 in the state of Pernambuco, when the Carpina Dam discharged 350 m³/s into the Capibaribe River after intense rainfall. Given this scenario, this study aimed to map flood-prone areas in the municipality of Paudalho-PE, considering hypothetical dam operation scenarios associated with rainfall events. To achieve this, IDF equations were applied to estimate average rainfall, with the influence area of each equation defined using the Thiessen Polygon method. Return periods of 10, 50, and 100 years were analyzed, with rainfall temporal distribution based on Huff's method (1967). The hydrological model was developed using the HEC-HMS software with the Soil Conservation Service (SCS) method, while the hydraulic model was implemented in HEC-RAS. Both models utilized topographic data obtained from the Pernambuco Tridimensional Project (PE3D) laser survey. The simulations produced peak flows of 359.4 m³/s, 933.5 m³/s, and 1745.6 m³/s for the analyzed scenarios. These flows resulted in flood-prone areas of 1.49 km², 4.50 km², and 6.10 km², with water level elevations of 67.11 m, 70.40 m, and 73.43 m, respectively. Furthermore, the study assessed the impacts on urban infrastructures, including facilities such as the police station, the event square, and the city hall.

Keywords: Flood. SCS. HEC-HMS. HEC-RAS. Mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	30
Figura 2 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe	31
Figura 3 - Isoietas anuais médias.....	32
Figura 4 - Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.....	34
Figura 5 - Sistema de Controle de Cheias do Capibaribe.....	35
Figura 6 - Representação simplificada da operação Barragem de Carpina entre os meses de Maio e Julho	35
Figura 7 - Ponte do Cumbe interditada.....	36
Figura 8 - Bloqueio na Ponte do Cumbe	36
Figura 9 - Ponte do Beira Rio inundada pela cheia de 2011	39
Figura 10 - Localização da área de estudo	40
Figura 11 - Barragens com influência na área de estudo.....	40
Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo	41
Figura 13 - Estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	43
Figura 14 - Área de estudo subdividida em sub-bacias.....	44
Figura 15 - Área de influência das estações pluviométricas	49
Figura 16 - Quartis de HUFF (1967).....	51
Figura 17 - Gráfico da interpolação do segundo quartil de HUFF.....	51
Figura 18 - Modelo hidrológico gerado no software HEC-HMS.....	52
Figura 19 - Malha gerada no software HEC-RAS.....	54
Figura 20 - Refinamento da malha	54
Figura 21 - Indicação das condições de contorno.....	55
Figura 22 - Hidrogramas gerados no HEC-HMS	57
Figura 23 - Mancha de inundação para precipitação com T_r de 10 anos com barragem em condições normais de operação	58
Figura 24 - Mancha de inundação para precipitação com T_r de 50 anos com abertura total das comportas	58
Figura 25 - Mancha de inundação para precipitação com T_r de 100 anos com barragem vertendo	59
Figura 26 - Seção de análise.....	60
Figura 27 - Lâmina d'água na seção da ponte.....	61

Figura 28 - Áreas afetadas para o cenário 1	62
Figura 29 - Áreas afetadas para o cenário 2	62
Figura 30 - Áreas afetadas para o cenário 3	63
Figura 31 - Infraestruturas de Uso público afetadas em cada cenário.....	64
Figura 32 - Localização das estações fluviométricas	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do reservatório Carpina.....	37
Tabela 2 - Características do reservatório Cursai.....	38
Tabela 3 - Distribuição do uso do solo.....	41
Tabela 4 - Postos pluviometricos utilizados.....	42
Tabela 5 - CN médios das sub-bacias.....	45
Tabela 6 - Taxas de impermeabilização.....	45
Tabela 7 - Parametros das equações IDFs.....	48
Tabela 8 - Intensidades pluviometricas.....	48
Tabela 9 - Porcentagem de influência de cada posto em cada sub-bacia.....	49
Tabela 10 - Intensidade média.....	50
Tabela 11 - Dados de entrada no modelo HEC-HMS.....	53
Tabela 12 - Áreas afetadas.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDT	Modelo Digital de Terreno
PE3D	Pernambuco Tridimensional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRHS-PE	Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento de Pernambuco
USACE	United States Army Corps of Engineers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa e motivação	17
1.2	Objetivos gerais e específicos	17
1.2.1	Objetivos gerais	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEORICO	19
2.1	Desenvolvimento urbano e inundação	19
2.2	Medida de controle de cheias	20
2.3	Modelos matemáticos.....	22
2.3.1	Modelagem hidrológica.....	22
2.3.2	Modelos hidrodinâmicos.....	25
2.4	Mapas de inundação	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe	31
3.1.1	Localização e generalidades	31
3.1.2	Hidrografia.....	31
3.1.3	Clima.....	32
3.1.4	Geologia.....	33
3.1.5	Relevo	33
3.1.6	Cobertura vegetal.....	34
3.2	Sistema de controle de cheias do Capibaribe	34
3.2.1	Reservatórios	37
3.2.2	Enchente de 2011	38
3.3	Área de estudo	39
3.3.1	Uso e ocupação do solo.....	41
3.4	Base de dados	42
3.4.1	Topografia.....	42
3.4.2	Estações pluviométricas	42
3.5	Delimitação das sub-bacias	43
3.6	O modelo hidrológico.....	44
3.6.1	Método SCS.....	44

3.6.2	Chuva de projeto	47
3.6.3	HEC-HMS	52
3.7	Modelo hidrodinâmico	53
3.7.1	Geometria do modelo	53
3.7.2	Coefficiente de Manning	54
3.7.3	Condições de contorno	55
3.7.4	Simulação	55
3.8	Cenários Adotados	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Hidrogramas	57
4.2	Manchas de inundação	57
4.3	Altura das lâminas na seção próxima à ponte do Beira Rio.....	60
4.4	Áreas edificadas afetados	61
4.5	Verificação da ordem de grandeza das vazões geradas pelo modelo hidrológico	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5.1	Conclusões.....	66
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	67
	REFERENCIAS	68
	Apêndice A – Gráficos da distribuição temporal das chuvas por sub-bacia e tempo de retorno	77
	Apêndice B – Gráficos dos Hidrogramas por sub-bacia e cenários	85

1 INTRODUÇÃO

Desastres naturais relacionados a enchentes, alagamentos e inundações são eventos recorrentes que causam grandes prejuízos materiais e, em casos graves, resultam em perdas irreparáveis de vidas (Braga, 2016). O autor observa que a frequência de inundações em áreas urbanas e ribeirinhas no Brasil tem aumentado anualmente. Pereira (2018) atribui essa intensificação à crescente impermeabilização do solo, decorrente da urbanização, e à ocupação inadequada de áreas ribeirinhas, anteriormente caracterizadas como várzeas e planícies de inundação.

Com a ocupação urbana em áreas de planícies de inundação, o extravasamento de águas, antes visto como um fenômeno natural, passa a ser percebido como um desastre natural (Alcántara-Ayala, 2002). Amaral e Ribeiro (2009) destacam que essas áreas são naturalmente suscetíveis ao transbordamento dos cursos d'água, sendo, portanto, inadequadas para habitação. Em consequência, as populações, muitas vezes compostas por grupos menos favorecidos, enfrentam impactos negativos, incluindo perdas financeiras e sociais (Alcántara-Ayala, 2002; Vestana, 2008). Assim, a ocupação dessas áreas e a dinâmica natural dos rios evidenciam a necessidade de estratégias de controle e mitigação dos riscos.

Diante dessa demanda, as barragens desempenham um papel crucial no controle de inundações, pois regulam as vazões dos rios e contém cheias (Lambert, 2021). No entanto, ao se atingir a capacidade máxima do reservatório, as comportas — estruturas utilizadas para controle do nível de água — podem ser abertas para evitar o vertimento e reduzir o risco de rompimento. Embora essa ação seja necessária para garantir a segurança da estrutura, ela pode causar transtornos para as populações ribeirinhas, especialmente quando combinada com precipitações intensas. Em 2011, por exemplo, a abertura das comportas da barragem de Carpina resultou em problemas significativos para as comunidades às margens do rio Capibaribe (Fonseca Neto, 2018). Na ocasião, foram liberados 350 m³/s para o rio, o que corresponde a aproximadamente 87,5% da capacidade total de liberação das duas comportas. Segundo os operadores da barragem, se as comportas não tivessem sido abertas, o vertimento inevitável teria elevado o pico de vazão para mais de 1000 m³/s, resultando em inundações comparáveis às registradas na década de 1970 (Cirilo et al., 2011). Essa operação de liberação de água se estendeu por cerca de 10 dias, até que o nível de segurança fosse restabelecido (Pernambuco, 2021). Nesse contexto, a cidade de Paudalho, localizada às margens do rio

Capibaribe e a jusante da barragem de Carpina, se destaca como exemplo relevante devido ao histórico de inundações.

Kobiyama et al. (2006) apontam que diversas estratégias, como o monitoramento e a modelagem, são empregadas para analisar o impacto das inundações. Essas ferramentas permitem identificar áreas propensas a desastres naturais e simular a magnitude e o impacto de potenciais fenômenos. Considerando a vulnerabilidade de áreas como Paudalho a eventos de inundação, o presente estudo visa mapear as manchas de inundação, fornecendo subsídios para planejamentos preventivos. As hipóteses avaliadas incluem diferentes cenários de operação da barragem de Carpina, combinados com eventos pluviométricos.

1.1 Justificativa e motivação

O mapeamento das manchas de inundações em Paudalho é essencial para compreender os riscos associados a eventos de precipitação combinados com a operação da barragem de Carpina. As inundações representam um desafio socioambiental significativo, afetando especialmente as comunidades vulneráveis em áreas urbanas e ribeirinhas. A operação de abertura das comportas da barragem, embora necessária para evitar o vertimento, rompimento ou garantir a segurança das infraestruturas urbanas em caso de elevação do volume acumulado, pode agravar o impacto das inundações locais. Portanto, é fundamental monitorar e prever os efeitos desses eventos sobre a dinâmica fluvial da região, a fim de identificar as áreas suscetíveis e, possivelmente, subsidiar estratégias de prevenção e mitigação de riscos.

1.2 Objetivos gerais e específicos

1.2.1 Objetivos gerais

Mapear as manchas de inundação no município de Paudalho considerando diferentes cenários de precipitações em conjunto com os volumes oriundos de Carpina, a fim de identificar áreas vulneráveis.

1.2.2 Objetivos específicos

- Obter hidrogramas para eventos de chuva com tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos, considerando as vazões provenientes da barragem de Carpina somada ao volume gerado pelos eventos de precipitação.
- Mapear as manchas de inundação correspondentes aos hidrogramas gerados.
- Identificar a altura da lâmina d'água na seção da ponte Beira Rio localizada na cidade de Paudalho.
- Mapear as áreas habitadas afetadas e infraestruturas urbanas para cada cenário.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 Desenvolvimento urbano e inundação

A urbanização é um fenômeno global que tem intensificado a concentração populacional nas áreas urbanas, resultando em impactos ambientais e sociais significativos (Cunha; Rodrigues, 2024). Dentre esses impactos, destaca-se a interação entre urbanização e inundações, uma vez que, conforme afirma Rezende (2013), a urbanização atua como um fator agravante. No ambiente urbano, as modificações antrópicas promovem alterações no uso e ocupação do solo e nos cursos d'água. Fatores ou elementos do meio físico, como o relevo, precipitação, volume de água, cobertura vegetal, tipo e morfometria do canal, são tradicionalmente apontados como fatores que influenciam de maneira direta a ocorrência de cheias ou inundações nos baixos cursos dos rios (Amante, 2006; Costa, 2010; Oliveira, 2011; Rocha, 2015).

Kobiyama et al. (2010) ressaltam que o uso e a ocupação do solo, especialmente em planícies de inundação, são fatores antrópicos significativos que contribuem para desastres hidrológicos. De maneira semelhante, Silva e Santiago (2007) afirmam que a retirada da vegetação e a impermeabilização das superfícies reduzem a infiltração subterrânea, aumentam o escoamento superficial e sua velocidade, e diminuem o tempo de concentração da bacia. Isso faz com que as áreas mais baixas da bacia hidrográfica sejam atingidas mais rapidamente em comparação com sua condição rural.

O estudo de caso intitulado “Contribuição da Engenharia de Sedimentos ao Planejamento Territorial com Ênfase em Redução de Desastres Hidrológicos”, realizado na cidade de Joinville (SC) por Kobiyama et al. (2010), demonstrou que as inundações no município são mais associadas à ocupação territorial inadequada do que à pluviosidade, sugerindo que o fator humano desempenha um papel mais significativo que fatores hidrológicos. Além disso, Silveira et al. (2009) analisaram o histórico de inundações de 1851 a 2008 e descobriu que o aumento na frequência das inundações no município está mais relacionado ao crescimento populacional do que ao aumento das precipitações. Sendo assim, os autores constaram que não houve mudanças significativas no regime pluviométrico que justificassem este fator como o principal responsável pelo aumento da frequência das inundações.

Em face deste insistente quadro e de suas consequências socioambientais, o processo continuado de ocupação das margens de rios em cidades demanda de iniciativas eficientes para a gestão dessas áreas, para as dinâmicas sociais que ocorrem nelas e para a mitigação das vulnerabilidades existentes, especialmente para os grupos de baixa renda (Aragão; Gomes, 2016). Muitas cidades brasileiras enfrentam problemas relacionados a enchentes e inundações, sendo as regiões metropolitanas as mais vulneráveis, devido ao elevado número de núcleos habitacionais de baixa renda em terrenos marginais aos cursos d'água (Brasil, 2007). O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013) apresenta um panorama dos desastres naturais ocorridos entre 1991 e 2012. Durante esse período, as inundações, gradativas e bruscas, ocuparam o segundo lugar entre os desastres que mais impactam a população brasileira, afetando mais de 41 milhões de pessoas. Os estados litorâneos do Brasil que apresentaram a maior concentração de inundações bruscas foram Alagoas, Espírito Santo, Pernambuco, Santa Catarina e Rio de Janeiro.

No estado de Pernambuco “as inundações, em geral, ocupam o segundo lugar na categoria de desastres naturais que mais ocorrem, correspondendo à cerca de 26% dos registros totais. Entretanto, quando avaliada a distribuição espacial dos desastres, observa-se que as inundações constituem o desastre mais frequente nas mesorregiões Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife” (Verçosa, 2019). O total de registros oficiais de inundações e enxurradas alcança 486 casos dos anos de 1992 a 2012, dos quais 427 correspondem especificamente a enxurradas (inundações bruscas). No que diz respeito ao número de pessoas impactadas, mais de 2.199.323 foram afetadas por esses eventos em mais de 158 municípios (UFSC, 2013).

2.2 Medida de controle de cheias

A gestão das inundações urbanas requer a implementação de medidas específicas para reduzir o impacto de grandes volumes de água. Essas estratégias visam não apenas mitigar os danos materiais, sociais e econômicos associados às inundações, mas também promover a segurança da população e a preservação do ambiente urbano. Segundo Costa e Rocha (2019), essas medidas de controle se dividem em estruturais e não estruturais.

As medidas estruturais, conforme Tucci (2004), são intervenções que alteram o rio ou a bacia hidrográfica, modificando o sistema natural. Essas intervenções podem ser extensivas, afetando a bacia, como no caso de reflorestamento e mudanças no tipo de plantio, ou intensivas,

impactando diretamente o rio, como na construção de barragens, diques e modificações no leito. Além disso, o autor destaca que as medidas não estruturais são aquelas para adaptar-se ao comportamento do rio, incluindo sistemas de alerta de inundação, zoneamento de áreas de risco e seguros ou proteções individuais. O autor afirma que as ações sugeridas possuem um valor significativo e têm o potencial de contribuir para a implementação e o fortalecimento da gestão de risco em todo o país.

Ao longo da história, as barragens têm sido estruturas de importância crucial para diversas atividades humanas. Desde os impérios babilônicos, egípcios, persas, indianos e romanos, onde os reservatórios de água eram essenciais para a agricultura e o controle da vazão de corpos d'água (Jansen, 1980). No Brasil, as medidas de adaptação às mudanças climáticas incluem medidas estruturais, como a construção de barragens de contenção de cheias, diques, elevação dos aterros e obras de drenagem urbana (Marengo et al., 2017).

Nesse contexto, as barragens emergem como uma ferramenta importante para o controle de inundações, possibilitando a contenção de cheias e a regulação do fluxo dos rios. Essas estruturas são projetadas para controlar e mitigar os efeitos de inundações em áreas suscetíveis, armazenando temporariamente o excesso de água durante períodos de chuvas intensas e liberando-a de forma controlada, evitando que o fluxo de água exceda a capacidade dos rios e cause inundações em regiões habitadas ou agrícolas. Nesse sentido, é importante considerar que as inundações não são apenas eventos de origem natural, mas também social (Mattedi; Butzke, 2001).

Dessa forma, as barragens são fundamentais para a proteção de áreas urbanas, infraestrutura e terras agrícolas contra os danos de possíveis inundações. Em 2005, de acordo com Nilsson et al., existiam cerca de 45.000 barragens no mundo, que desempenhavam o papel crucial de reter aproximadamente 60% das águas superficiais que, de outra forma, desaguiariam nos oceanos. Além disso, elas podem ser projetadas também para produção de energia elétrica, no transporte e no abastecimento de água. Em Pernambuco, o uso de barragens como medida estrutural é essencial para a gestão de cheias. O estado conta com 13 barragens cuja principal função é a regularização de vazão, além de uma destinada à defesa contra inundações.

Assim, a crescente urbanização e a ocupação inadequada das margens de rios têm exacerbado os riscos de inundações nas áreas urbanas brasileiras, impactando desproporcionalmente as comunidades mais vulneráveis. A implementação de medidas efetivas de gestão e controle de inundações é essencial para proteger essas populações e promover um desenvolvimento urbano sustentável.

2.3 Modelos matemáticos

Os modelos, em sua essência, são abstrações ou representações da realidade, sendo a forma como as pessoas percebem o mundo ao seu redor um exemplo de modelagem, pois essa percepção é sempre uma simplificação da realidade que ignora ou adapta certas características (Mendes e Cirilo, 2011). Assim, os modelos tornam-se representações simplificadas de sistemas ou fenômenos reais, criados para facilitar a compreensão de seus componentes, comportamentos, características e respostas a diferentes cenários (Verçosa, 2019).

Padilha (2017) adiciona que os modelos contribuem para ampliar o entendimento de aspectos específicos e facilitam a resolução de vários problemas, minimizando a necessidade de experimentações práticas e evitando abordagens analíticas complexas.

Essas representações são especialmente úteis em áreas como a hidrologia e a hidrodinâmica, onde fenômenos complexos como o escoamento superficial e a drenagem urbana precisam ser compreendidos de forma integrada. Nesse contexto, a modelagem hidrológica e hidrodinâmica se consolida como uma abordagem fundamental (Verçosa, 2019) para a análise e previsão de comportamentos hídricos em resposta a diferentes condições (Chormanski et al., 2011; Grimaldi et al., 2013; Bozza et al., 2016; Monte et al., 2016).

2.3.1 Modelagem hidrológica

Em contextos complexos, como os das bacias hidrográficas, os modelos hidrológicos tornam-se ferramentas essenciais, permitindo a interpretação e a previsão de eventos. Esses modelos são estruturados a partir de equações que conectam variáveis mensuráveis, como precipitação e vazão, possibilitando uma aproximação do que ocorre em um sistema hidrológico real (Chow et al., 1988).

De acordo com Mota (1999), citado por Moreira (2005) um modelo hidrológico visa estimar com precisão e eficiência o comportamento e a magnitude da água em uma bacia hidrográfica, seu principal objetivo é determinar, de maneira eficaz, os componentes do ciclo hidrológico nessa bacia. Além disso, esses modelos possibilitam a calibração e a verificação da

consistência das informações obtidas por meio das estações hidrológicas, permitindo a coleta de dados em bacias que não são monitoradas (Santos, 2009).

Kaiser (2006) observa que os modelos hidrológicos possuem uma ampla gama de aplicações. Eles podem ser usados para simular vazões em cursos de água de bacias em processo de intervenção, gerenciar barragens e sistemas de alerta para cheias, além de analisar o impacto de obras hidráulicas e atividades humanas em uma bacia hidrográfica. Adicionalmente, esses modelos são úteis para estender séries de dados fluviométricos na elaboração de projetos de engenharia e para simular diferentes fases do ciclo hidrológico.

Nesse contexto, Tucci (2005) destaca que os modelos emergem da necessidade de obter séries hidrológicas mais extensas e representativas das vazões, fundamentais para diversos projetos na área de recursos hídricos. Portanto, esses modelos constituem um recurso valioso que auxilia na tomada de decisões em projetos, permitindo a adoção de técnicas mais eficientes em sua implementação (Filho et al., 2012).

Segundo Rodrigues (2021), diversos modelos hidráulicos são amplamente utilizados em vários países. Entre os mais comuns estão o SOBEK, da Holanda; o InfoWorks, da Inglaterra; o MOUSE-DHI, da Dinamarca; e o SWMM, dos Estados Unidos. Modelos conceituais mais antigos incluem o SSARR, o STANFORD IV, os Modelos do MIT e o HEC-1 (Tucci, 2005), que atualmente foi substituído pelo HMS. No Brasil, os pesquisadores empregam principalmente o modelo ABC, da USP; o IPH, da UFRGS; e o MODCEL, da UFRJ (Cabral et al., 2009).

O modelo HEC-HMS foi escolhido por sua ampla aplicação em estudos hidrológicos e por ser um dos mais conhecidos e universalmente utilizados (Santos, 2017).

Modelo HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 2000), é um software projetado para modelar processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas, simulando seu comportamento hidrológico. Com essas simulações, o software gera hidrogramas e fornece dados sobre o volume de escoamento, vazão de pico e tempo de escoamento, que podem ser aplicados em diversos contextos, como drenagem urbana, disponibilidade hídrica, dimensionamento de vertedores em barragens e previsão de cheias (USACE, 2023).

O HEC-HMS, criado inicialmente para apoiar estudos realizados pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), é amplamente reconhecido e utilizado na modelagem hidrológica. Classificado como um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico, o HEC-HMS permite simular processos como evaporação, precipitação e escoamento em bacias hidrográficas (USACE, 2023).

O HEC-HMS é composto por três componentes principais: o Modelo de Bacia, o Modelo Meteorológico e as Especificações de Controle (USACE, 2023). Nesse contexto, segundo Tavares e Castro (2005), a elaboração de um projeto é realizada de forma modular, permitindo a manipulação independente dos conjuntos de dados, mas sempre seguindo uma sequência específica para a execução das simulações. O primeiro componente é a Modelagem da Bacia Hidrográfica, que se ocupa da inserção e manipulação de dados sobre a geometria da bacia, incluindo suas sub-bacias, rios, reservatórios e canais. Esse componente também define métodos e parâmetros para perdas por infiltração, evaporação, interceptação, e para a transformação chuva-vazão, cálculo do escoamento de base e propagação em rios. O segundo componente, a Modelagem Meteorológica, trata da entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, selecionando o método adequado para sua distribuição temporal. Por fim, as Especificações de Controle definem os períodos de simulação, abrangendo o início e o fim dos cálculos.

De acordo com Milde et al. (2002), o modelo considera que uma bacia hidrográfica pode ser representada como um conjunto de áreas interconectadas, com processos hidrológicos descritos por parâmetros que refletem as condições médias dessas áreas. Caso essas condições médias não sejam adequadas para uma sub-bacia específica, torna-se necessário dividir a bacia em sub-áreas menores, onde essas médias possam ser mais aplicáveis. Peters (1998) observa que o modelo oferece uma interface gráfica intuitiva e diversas funcionalidades. Cada parâmetro pode ser analisado individualmente para gerar novas saídas do modelo hidrológico, permitindo, posteriormente, um pós-processamento por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Tavares e Castro (2005) destacam que a engenharia hidrológica tem se beneficiado significativamente do desenvolvimento de programas que utilizam algoritmos para quantificar processos hidrológicos. Macedo (2010) complementa, afirmando que o software é amplamente utilizado na modelagem hidrológica, independentemente da ordem final de sua aplicação.

Fonseca Neto (2018), desenvolveu um modelo hidrológico no HEC-HMS para avaliar a vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho Cavouco, no Recife-PE, em relação a eventos

de chuvas intensas, à abertura ou fechamento das comportas de barragem de controle de cheias e impacto das marés.

Verçosa (2019), desenvolveu um modelo hidrológico no HEC-HMS para avaliar a ocorrência de inundações no Recife-PE, causadas pelas cheias no rio Capibaribe, considerando eventos extremos e cenários de aumento do nível do mar.

Borba (2017), utilizou o HEC-HMS para buscar melhorias e aperfeiçoar o modelo hidrológico presente na estrutura computacional (Monitor Avançado de Enchentes – Maven) aplicado à bacia do Rio Una, em Pernambuco, de modo que as contribuições pudessem subsidiar melhorias na gestão da bacia.

Por fim, Magalhães (2023), utilizou o software para desenvolver modelos hidrológicos e simular diferentes hietogramas para as bacias do Rio Frágoso e Paratibe em Olinda-PE. Os hidrogramas gerados foram empregados na simulação dos efeitos do escoamento superficial no Canal do Frágoso.

2.3.2 Modelos hidrodinâmicos

Os modelos hidrodinâmicos visam descrever o comportamento e o movimento da água, permitindo a simulação de aspectos como a velocidade de escoamento, a altura da lâmina d'água, bem como as cotas e a extensão das áreas alagadas. Para isso, eles empregam as equações de Saint-Venant e são categorizados em modelos de onda cinemática, de difusão e hidrodinâmicos (Verçosa, 2019).

De acordo com Rodrigues (2021), quando os termos de inércia e pressão são desconsiderados, utiliza-se o modelo de onda cinemática, que apresenta a limitação de não conseguir simular certos fenômenos, como os efeitos de jusante no escoamento. Modelos que consideram apenas os termos de pressão, atrito e gravidade são chamados de modelos de difusão (Verçosa, 2019). Em contraste, os modelos que resolvem as equações em sua forma completa são denominados hidrodinâmicos completos e têm a capacidade de representar com precisão os principais fenômenos do escoamento em canais (Rodrigues, 2021).

Conforme Verçosa (2019), os escoamentos em superfície livre podem ser categorizados em regime permanente e não-permanente. No regime permanente, tanto o gradiente da velocidade quanto o nível não variam com o tempo, o que implica uma condição estável. No entanto, na prática, essa situação não ocorre naturalmente, pois as variáveis de estado dos escoamentos superficiais estão sempre sujeitas a oscilações, mesmo que sejam sutis e lentas.

Por outro lado, o regime não-permanente se caracteriza pela variação temporal e espacial das variáveis envolvidas. Escoamentos não-permanentes em canais e rios são regidos pelos princípios da conservação de massa e quantidade de movimento e podem ser modelados em uma ou mais dimensões espaciais.

Sendo assim, a simulação hidrodinâmica é responsável pela interação das propriedades topográficas, com as propriedades hidrológicas e hidráulicas.

Modelo HEC-RAS

O HEC-RAS (Hydrological Engineering Center- River Analysis System), software desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers), realiza cálculos hidráulicos em canais naturais e artificiais, baseando-se na resolução das equações unidimensionais ou bidimensionais de Saint-Venant para modelagem hidráulica (USACE, 2024).

Dessa forma, o programa possibilita diversas análises, como fluxos permanentes, transporte e deposição de sedimentos em leitos de rios, além de estudos sobre a qualidade da água. Adicionalmente, o software possibilita a análise de áreas sujeitas a inundações e a simulação de rompimentos de barragens (USACE, 2024). Atualmente, o modelo realiza cálculos hidráulicos em 1D, 2D e de forma acoplada 1D/2D, permitindo a simulação de escoamento em regime permanente, quase permanente e não permanente, nos regimes crítico, subcrítico e misto. (USACE, 2024).

O software é capaz de simular o escoamento em canais, definindo um perfil da superfície da água utilizado para delimitar as áreas sujeitas a inundações. Isso é feito por meio da definição de uma área de fluxo bidimensional, na qual é inserida uma malha computacional que possibilita os cálculos (Tonet, 2023).

Entre as principais aplicações do HEC-RAS, destacam-se os estudos voltados para a determinação de áreas de inundação e o desenvolvimento de medidas de proteção contra enchentes. Além disso, o software permite a avaliação dos impactos causados por obstáculos hidráulicos, como pontes, bueiros, vertedouros, diques e outras estruturas.

Lins (2019) analisou cenários de escoamento no Canal Beira Rio, em Jaboatão dos Guararapes-PE. O estudo utilizou o método SCS para calcular vazões de projeto e simulou, no HEC-RAS, diferentes intervenções, como revestimento e bacias de detenção.

Lambert (2021) utilizou o HEC-RAS para mapear manchas de inundação em diversos cenários de ruptura da barragem de Carpina, com foco na cidade do Recife, Pernambuco. Com base nas profundidades e velocidades atingidas, foi possível elaborar um mapa de risco de inundação para a cidade.

Por fim, Alves (2017) utilizou o software para simular os efeitos da construção de barragens nas cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros na Zona da Mata Sul de Pernambuco, para o maior evento de chuva já registrado na bacia do Rio Una, ocorrido em 2010.

2.4 Mapas de inundação

Segundo Rodrigues (2021), o mapeamento de áreas vulneráveis a inundações se configura num elemento fundamental para a definição de medidas não estruturais de controle de desastres naturais. O mapeamento é uma das etapas mais essenciais entre todas as medidas disponíveis, pois possibilita a identificação antecipada de regiões propensas a inundações e, portanto, a elaboração de estratégias eficazes de mitigação. Esse processo pode ser realizado utilizando diversas metodologias e ferramentas de apoio, oferecendo subsídios para a reestruturação do espaço urbano, pois pode auxiliar na definição de novas diretrizes de ocupação em uma cidade (Frank; Pinheiro, 2003; Momo et al., 2016). Friesecke (2004), ressalta que esses mapas deveriam servir como a base fundamental para todos os programas de mitigação de danos, evidenciando sua importância para a gestão do território.

O mapa de inundação delimita as áreas inundadas e indica a altura da lâmina d'água, sendo vinculado a um único período de retorno (Monteiro; Kobiyama, 2013). Conforme os autores, o mapa pode ser gerado de duas formas distintas: pela elaboração de uma mancha de inundação com base em dados observados durante o evento de inundação ou por meio da modelagem hidrodinâmica. O primeiro método oferece maior precisão, mas sua realização é mais complexa, pois os dados devem ser coletados durante a ocorrência da inundação (Giglio; Kobiyama, 2011). No segundo método, que envolve a modelagem hidrodinâmica, são empregados modelos físicos ou matemáticos (Monteiro; Kobiyama, 2013).

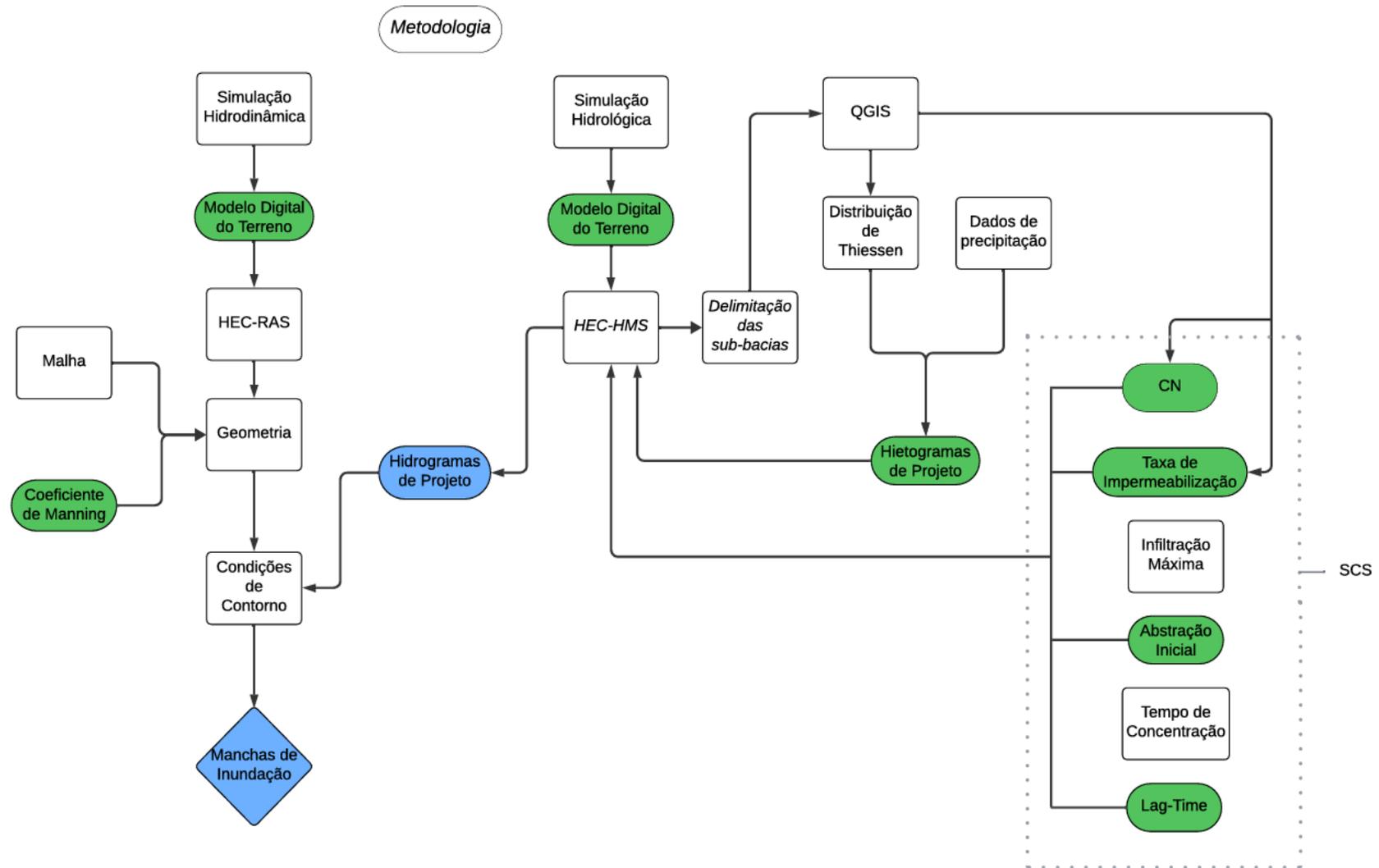
Diversas medidas são adotadas para mitigar os danos causados por transbordamentos de rios e alagamentos nas áreas urbanas situadas às margens desses cursos d'água. Entre essas medidas, o mapeamento se destaca como uma das etapas mais importantes, conforme afirma Shidawara (1999). Isso se deve ao fato de que o mapeamento permite a identificação antecipada

das regiões vulneráveis a desastres naturais possibilitando intervenções mais efetivas e a implementação de políticas públicas adequadas. Além disso, ele é fundamental para a reestruturação do espaço urbano e para a definição de novas diretrizes de ocupação nas cidades, como apontado por Oliveira et al. (2010). Assim, é evidente que o mapeamento de inundações desempenha um papel crucial na gestão de riscos, não apenas ajudando a mitigar os impactos imediatos de eventos extremos, mas também contribuindo para um planejamento urbano mais sustentável e resiliente.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a área de estudo e apresenta os conceitos relacionados aos materiais e métodos utilizados na modelagem hidrológica e hidrodinâmica para a obtenção das manchas de inundação. Para melhor compreensão do processo metodológico, pode ser observado na Figura 1 o fluxograma que ilustra de forma clara e sequencial as etapas envolvidas na pesquisa, dando destaque aos dados de entradas nos softwares e aos produtos gerados.

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho

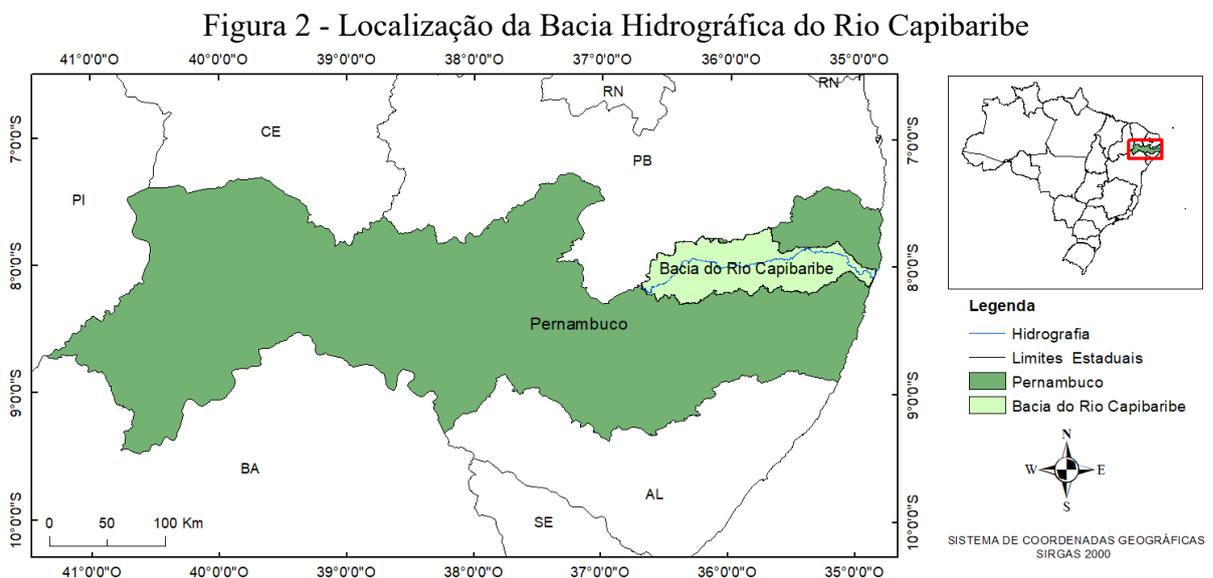


Fonte: A autora (2024).

3.1 Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe

3.1.1 Localização e generalidades

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe, pertencente à Unidade de Planejamento Hídrico 2 de Pernambuco, cobre uma área de 7.454,88 km², o que corresponde a 7,6% do território estadual (Figura 2). Localizada na região nordeste do estado, entre as latitudes 07°41'20" e 08°19'30" sul, e longitudes 34°51'00" e 36°41'58" oeste, a bacia abrange partes do Agreste Central, Agreste Setentrional, Mata Norte, Mata Sul e Região Metropolitana do Recife (Pernambuco, 2010).



3.1.2 Hidrografia

O rio Capibaribe percorre aproximadamente 280 km, atravessando 42 municípios desde sua nascente, localizada entre os municípios de Poção e Jataúba, até desaguar no Recife. Desses municípios, 15 estão completamente inseridos na bacia hidrográfica, enquanto 26 têm suas sedes dentro dessa área (Pernambuco, 2006). Salgueiro et al. (2014) afirmam que o rio é alimentado por cerca de 70 afluentes ao longo do percurso, distribuídos em ambas as margens. O regime fluvial do Capibaribe é intermitente nos trechos superior e médio, tornando-se perene no curso inferior. O Alto Capibaribe, que se estende da nascente até Taquaratinga do Norte, caracteriza-se por altitudes mais elevadas, influenciadas pelo Planalto da Borborema. O Médio

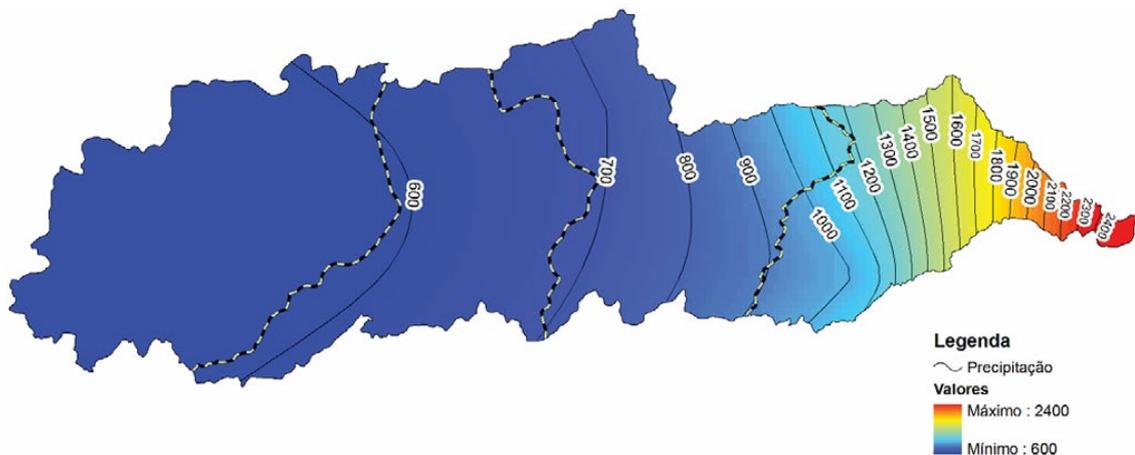
Capibaribe vai até Limoeiro, ponto em que o regime hídrico se torna perene. A partir daí, o Baixo Capibaribe cobre o restante do trajeto até a foz.

3.1.3 Clima

O clima da bacia do rio Capibaribe é, em sua maioria, característico da região semiárida, com dois tipos climáticos predominantes: no alto e médio curso do rio, situados no Agreste, prevalece o clima quente e semiárido, enquanto o baixo curso do Capibaribe apresenta um clima quente tropical úmido (Ribeiro Neto et al., 2014).

As precipitações mensais na bacia hidrográfica do rio Capibaribe exibem alta variabilidade, com totais anuais variando entre 600 e 2400 mm (Figura 3). Em média, os valores anuais de precipitação são de 1133,59 mm, com um aumento dos índices pluviométricos conforme se aproxima do litoral.

Figura 3 - Isoietas anuais médias



Fonte: Pernambuco (2010).

A evapotranspiração potencial anual varia entre as Unidades de Análise (UAs) da região, que correspondem a divisões da bacia hidrográfica estabelecidas pelo Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Capibaribe em 2002, para fins de estudo. A Unidade 1 (UA1) está localizada na região do Alto Capibaribe; as Unidades 2 (UA2) e 3 (UA3) estão localizadas na região do Médio Capibaribe; enquanto a última unidade (UA4) está situada na região do Baixo Capibaribe (Pernambuco, 2010).

Na UA1, os valores de evapotranspiração potencial anual variam de 1700 a 1850 mm, aumentando de norte a sul. Na UA2, os valores variam de 1600 a 1900 mm, seguindo a mesma

tendência. Na UA3, observa-se uma redução em direção ao reservatório Carpina, atingindo 1580 mm. Já na UA4, os valores mais altos, de aproximadamente 1700 mm, ocorrem no sudoeste, diminuindo para 1500 mm em direção ao litoral. As temperaturas médias anuais da bacia estão entre 20,46°C e 26,14°C, com máximas de 25,50°C a 29,92°C. Há um período mais frio de abril a setembro e um período mais quente de outubro a março.

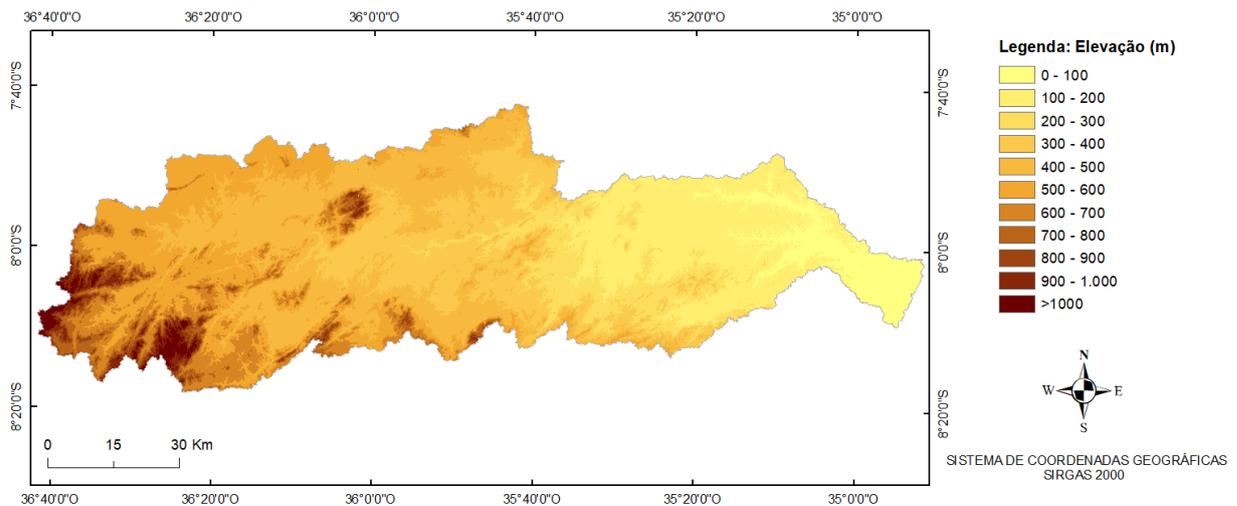
3.1.4 Geologia

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe é predominantemente composta por rochas do embasamento cristalino, com áreas sedimentares concentradas no baixo curso do rio. O embasamento cristalino subsuperficial encontra-se em contato com a Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba na região do Recife, onde é estreito e inclui a Formação Beberibe, um depósito fluvial de alto potencial aquífero (aquífero Beberibe). No baixo Capibaribe, próximo à Região Metropolitana do Recife, está presente a Formação Barreiras, composta por camadas sedimentares dispersas que recobrem tanto o embasamento cristalino quanto a bacia sedimentar. Nas áreas baixas da planície costeira, encontram-se sedimentos quaternários, com os mais recentes formados por depósitos estuarinos e marinhos (Pernambuco, 2010).

3.1.5 Relevo

De acordo com Pernambuco (2010), a bacia do rio Capibaribe apresenta diferentes compartimentos morfoestruturais relacionados ao Planalto da Borborema. No alto e médio curso do rio, destacam-se os maciços rochosos, enquanto no baixo curso predominam os tabuleiros e a planície costeira. Na Figura 4 é apresentado o mapa hipsométrico da bacia, que ilustra a distribuição das altitudes na região.

Figura 4 - Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe



Fonte: A autora (2024).

3.1.6 Cobertura vegetal

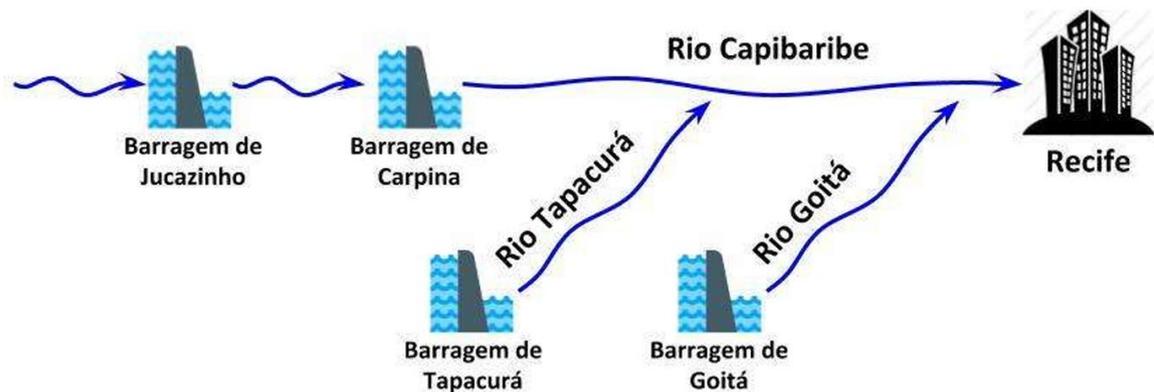
Além disso, a cobertura vegetal da bacia atravessa áreas dos biomas Caatinga e Mata Atlântica, desde as nascentes até a foz no Recife. Essa diversidade de biomas está associada à variedade de solos e relevo da região, criando uma ampla gama de ambientes naturais. No entanto, esses ambientes foram significativamente alterados e simplificados devido à ação humana, resultando em uma modificação expressiva da paisagem original.

3.2 Sistema de controle de cheias do Capibaribe

O sistema de controle de cheias do Rio Capibaribe (Figura 5) é composto pelas barragens de Jucazinho, Carpina, Goitá e Tapacurá. A primeira construída pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), enquanto as demais foram construídas pelo DNOS (Departamento de Obras e Saneamento) e, atualmente, são administradas pela Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) (APAC, 2024¹).

¹ O documento intitulado de “Protocolo Para Operação Dos Sistemas De Controle De Cheias Das Bacias Hidrográficas Do Rio Capibaribe e Una 2024” foi obtido diretamente junto à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) em 15/08/2024.

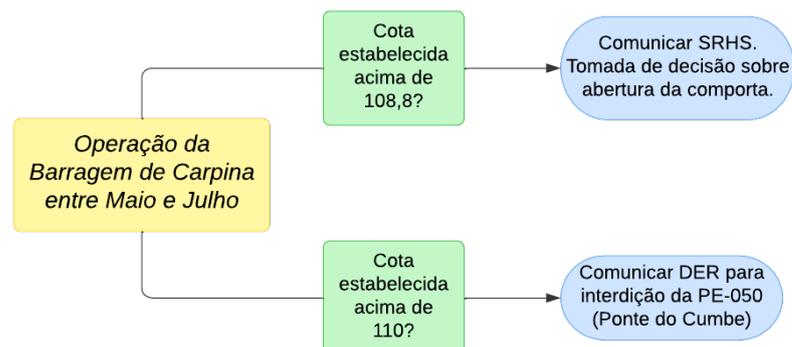
Figura 5 - Sistema de Controle de Cheias do Capibaribe



Fonte: Verçosa (2019).

Ainda segundo a APAC (2024), as regras de operação baseiam-se nas cotas e volumes observados nos reservatórios de Jucazinho e Carpina. A operação do reservatório de Carpina é diretamente influenciada pela condição da barragem de Jucazinho durante eventos pluviométricos críticos. Em tais situações, a abertura das comportas é realizada com cautela, considerando os níveis de água a jusante e as previsões meteorológicas, de modo a minimizar impactos nas áreas ribeirinhas. Assim, evita-se a liberação indiscriminada de água.

Figura 6 - Representação simplificada da operação Barragem de Carpina entre os meses de Maio e Julho



Fonte: A autora (2024).

A Figura 6 apresenta o processo simplificado da operação de Carpina entre os meses de maio e julho. Esse processo é conduzido com base no volume de água e na cota dos reservatórios, além de envolver comunicações com entidades como o DER (Departamento de Estradas de Rodagem) e a SRHS (Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento).

Uma das decisões críticas nessa operação é a interdição da Ponte do Cumbe, localizada entre os municípios de Feira Nova e Limoeiro, caso a cota ultrapasse 110 m, situação em que o DER deve ser informado. Já a abertura das comportas depende da aprovação da SRHS, caso a cota exceda 108,8 m.

A ponte do Cumbe é uma das principais ligações entre as duas cidades, sendo crucial para o tráfego local. Em eventos de cheia, como em 2011 e 2022 (Figura 7 e Figura 8, respectivamente), a ponte foi interditada devido ao aumento significativo do nível das águas, resultando em transtornos para a população local, que depende desse acesso para o deslocamento. Segundo o Portal G1 de Notícias (2022), a interdição na PE-50, na Ponte do Cumbe, também afeta o acesso a outras cidades além de Feira nova, como Lagoa de Itaenga, Vitória de Santo Antão e Carpina, obrigando motoristas a desviar pela Rodovia Paulo Petribu, aumentando o trajeto em cerca de 50 quilômetros. O Portal CBN Recife (2023) complementa relatando que, por conta da inundação algumas pessoas se arriscam a atravessar o trecho com água acima da cintura, enquanto outras optam por pagar pela travessia de barco.

Figura 7 - Ponte do Cumbe interditada



Fonte: Blog do Agreste (2011).

Figura 8 - Bloqueio na Ponte do Cumbe



Fonte: Portal G1 de notícias (2022).

Nesse contexto, mesmo que a abertura das comportas seja necessária para evitar o rompimento/vertimentos e a inundação da ponte do Cumbe, o Protocolo destaca que, em momentos críticos, é importante evitar a liberação indiscriminada de água das barragens, visando atender às cotas especificadas na Figura 6.

Com base em simulações da APAC (2024) para condições extremas em Jucazinho e eventos pluviométricos intensos, a vazão máxima estimada de vertimento da barragem de

Carpina é de 1.118 m³/s. Esse valor será considerado em um dos cenários propostos no presente trabalho.

3.2.1 Reservatórios

Barragem Carpina

O reservatório Carpina, inaugurado em 1978 no município de Feira Nova, está localizado no rio Capibaribe e tem uma capacidade máxima de 255 milhões de metros cúbicos (Tabela 1). Situado nas coordenadas 7°53'41"S e 35°20'14"W, o principal objetivo de sua construção foi o controle de enchentes a jusante. Ele possui um volume de retenção para enchentes de 189 milhões de metros cúbicos, deixando um volume útil de aproximadamente 81 milhões de metros cúbicos para alimentar uma adutora que abastece a região metropolitana do Recife. O reservatório tem um coroamento com extensão total de 1.720 metros, sendo 990 metros da barragem e 730 metros de diques. Suas duas comportas têm capacidade para liberar cerca de 400 m³/s (Pernambuco, 2010). E segundo a COMPESA (1998), possui uma vazão regularizada de 1,69m³/s.

Tabela 1 - Características do reservatório Carpina.

Reservatório Carpina	
Área da bacia hidrográfica	6000 km ²
Capacidade máxima	255 hm ³
Cota de coroamento	124 m
Extensão do coroamento	990 m
Cota do sangradouro	118 m

Fonte: APAC (2020).

O reservatório foi construído após a cheia de 1975, quando fortes chuvas atingiram o médio Capibaribe, elevando o nível do rio em mais de 8 metros acima do normal e gerando uma vazão de pico estimada em cerca de 3.000 metros cúbicos por segundo (Góes, 2009). Essa inundação foi a maior já registrada no Recife e afetou 25 municípios da bacia do Capibaribe, incluindo Paudalho. Na época, a barragem de Tapacurá era a única existente a montante do Recife, regulando apenas o rio Tapacurá e incapaz de conter o volume de água proveniente do médio Capibaribe. Após essa tragédia, foram adotadas várias medidas de controle, incluindo a construção da barragem de Carpina para prevenir futuras enchentes.

Barragem Cursaí

A barragem Cursaí tem um papel fundamental na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, sendo destinada ao abastecimento de água para consumo humano, ao contrário do reservatório de Carpina, que foi projetado para conter cheias. Localizada no município de Paudalho, nas coordenadas 7°52'41.7"S e 35°10'30.5"W, a barragem de concreto, abastece as cidades de Paudalho, Carpina, Tracunhaém e Lagoa do Itaenga, com uma vazão média de 250 litros por segundo. Construída em terra, a barragem possui 137 metros de extensão pelo coroamento, 16,5 metros de altura e uma capacidade de 13 milhões de metros cúbicos (hm³) de água (Tabela 2). O vertedouro lateral, do tipo Creager, tem 20 metros de largura e 3,5 metros de altura, com um vertimento médio de 217,10 litros por segundo.

Tabela 2 - Características do reservatório Cursaí

Reservatório Cursaí	
Área da bacia hidrográfica	57 km ²
Capacidade máxima	13 hm ³
Cota de coroamento	96,00 m
Extensão do coroamento	137,00 m
Cota do sangradouro	91,27 m
Extensão do sangradouro	57,00 m
Cota da tomada D'água	79,50 m

Fonte: APAC (2015).

3.2.2 Enchente de 2011

A cidade de Paudalho tem grande parte de seu território localizado dentro da bacia do rio Capibaribe, com sua área urbana posicionada às margens do rio. De acordo com o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações da ANA (2024), o município é classificado com vulnerabilidade moderada a alta, devido à sua localização na área mais plana da bacia. Além disso, em todo o estado foram identificados 397 trechos inundáveis em 76 cursos d'água em 134 dos 185 municípios. Desses, 157 foram considerados de alta vulnerabilidade a inundações graduais; 164 de média vulnerabilidade; e 76 de baixa vulnerabilidade.

Gomes (2019) e Verçosa (2019) relatam eventos de chuvas intensas significativas que impactaram o sistema de barragens do Capibaribe. Verçosa (2019) menciona que, em maio de 2011, chuvas intensas levaram ao transbordamento das barragens de Tapacurá, Jucazinho e Goitá, com a barragem de Carpina atingindo 80% de sua capacidade. Gomes (2019)

complementa que, após o volume de Carpina alcançar 170 milhões de m³, foi necessária a abertura das comportas, aumentando o fluxo do rio Capibaribe para 700 m³/s, o que causou alagamentos em áreas baixas e exigiu monitoramento contínuo e evacuação de populações ribeirinhas.

Segundo a curva cota-área-volume do reservatório (APAC, 2015), o nível da barragem se aproximou da cota de 114 m. Paudalho, situada a jusante da barragem de Carpina, foi uma das cidades afetadas pelas inundações, com áreas urbanas impactadas, incluindo infraestruturas como o pátio de eventos e a ponte do Beira Rio, conforme ilustrado na Figura 9. O posto fluviométrico localizado no centro da cidade, de código 39150000 sob as coordenadas 7,9° S e 35,17° W, registrou uma vazão de 444,93 m³/s (ANA, 2011).

Figura 9 - Ponte do Beira Rio inundada pela cheia de 2011

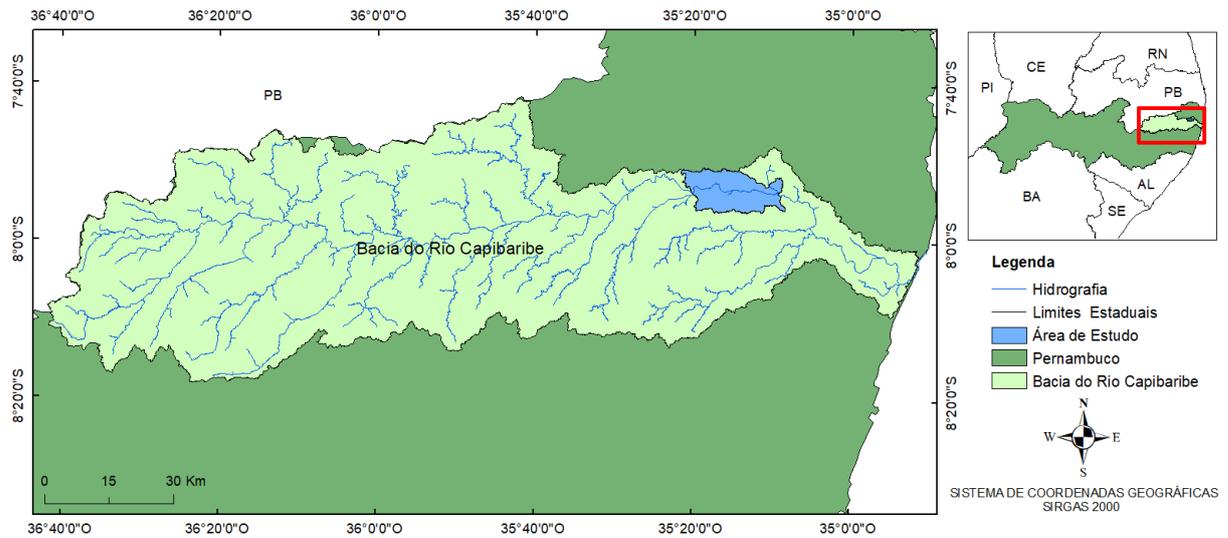


Fonte: Araújo (2011).

3.3 Área de estudo

Este estudo foi conduzido em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, que abrange aproximadamente 2,36% da área total da bacia (Figura 10), correspondendo a 175,24 km². A área de estudo está distribuída entre os municípios de Paudalho, Lagoa de Itaenga, Carpina e Lagoa do carro e Feira nova.

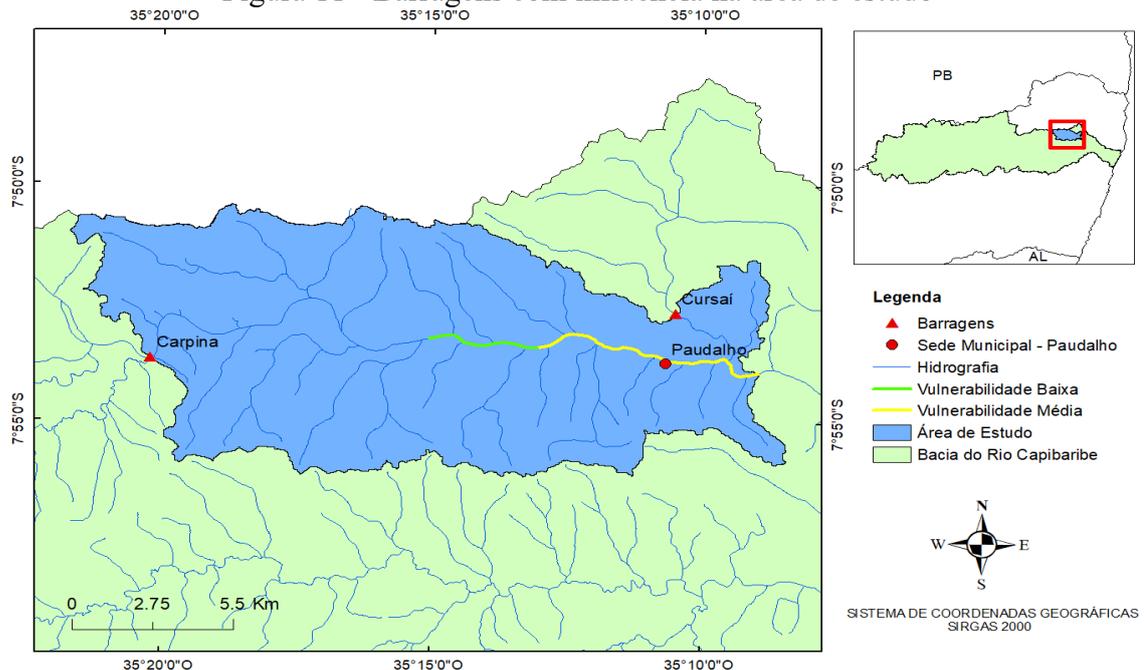
Figura 10 - Localização da área de estudo



Fonte: A autora (2024).

A delimitação da área de interesse foi estabelecida a partir da barragem de Carpina, devido ao seu papel na regularização da vazão nesse trecho do rio Capibaribe. A área estende-se até o limite de vulnerabilidade a inundações determinado pela ANA (2012) na cidade de Paudalho, conforme ilustrado na Figura 11. A barragem do Cursai foi igualmente considerada, em razão do barramento no fluxo do Riacho Gameleira, afluente do Rio Capibaribe no trecho de modelagem.

Figura 11 - Barragens com influência na área de estudo

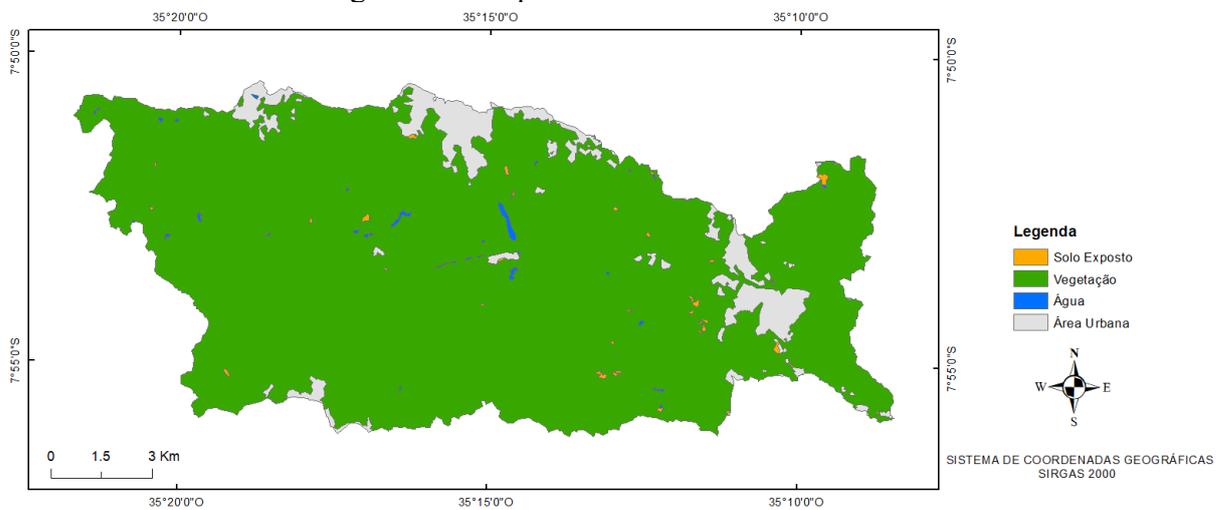


Fonte: A autora (2024).

3.3.1 Uso e ocupação do solo

Com base no mapa de uso e ocupação do solo do MapBiomas do Brasil — projeto de iniciativa do Observatório do Clima, co-criado e desenvolvido por uma rede multi-institucional envolvendo universidades, ONGs e empresas de tecnologia, com o propósito de mapear anualmente a cobertura e o uso da terra no Brasil (MapBiomas, 2024) — a ocupação do solo foi reclassificada em quatro categorias: área urbana, corpos d'água, solo exposto e vegetação (Figura 12).

Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo



Fonte: A autora (2024).

Esse mapeamento permitiu identificar as informações apresentadas na Tabela 3, levando à conclusão de que o uso predominante do solo na área de estudo é a vegetação, que cobre mais de 93% da região. A Área Urbana ocupa 6,27%, enquanto as categorias de Solo Exposto e Água apresentam percentuais menores, com 0,29% e 0,28%, respectivamente. Esses dados indicam que a maior parte da área é dominada por cobertura vegetal, com uma presença urbana relativamente pequena.

Tabela 3 - Distribuição do uso do solo

Uso	Área (km ²)	%
Solo Exposto	0,50	0,29
Vegetação	163,23	93,15
Água	0,52	0,28
Área Urbana	11,00	6,27
Total	175,24	100,00

Fonte: A autora (2024), com base nos dados do MapBiomias (2024).

3.4 Base de dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados em sites de órgãos governamentais, como a Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) e a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), que fornecem informações dos postos pluviométricos, além do Pernambuco Tridimensional (PE3D), responsável por disponibilizar dados altimétricos.

3.4.1 Topografia

A topografia da região é fundamental para as simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, uma vez que a precisão dos dados fornecidos impacta diretamente a fidelidade das simulações em relação à realidade. Portanto, é crucial que as condições testadas reflitam as observações reais em campo. O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado é um mapa que representa a altimetria da superfície, gerado a partir do processamento de imagens obtidas por mapeamento aerofotogramétrico (Pernambuco, 2016).

O MDT foi originalmente capturado em 2014, com uma resolução de 1 m x 1 m, e disponibilizado pelo projeto Pernambuco Tridimensional, que abrange o mapeamento territorial de todo o estado de Pernambuco. Para a etapa hidrológica, o MDT inserido no modelo foi reamostrado para uma resolução de 30 m x 30 m; para a etapa hidrodinâmica, foi utilizado o MDT original. O sistema de coordenadas projetadas adotado é o UTM SIRGAS 2000.

3.4.2 Estações pluviométricas

As estações pluviométricas utilizadas são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Postos pluviometricos utilizados

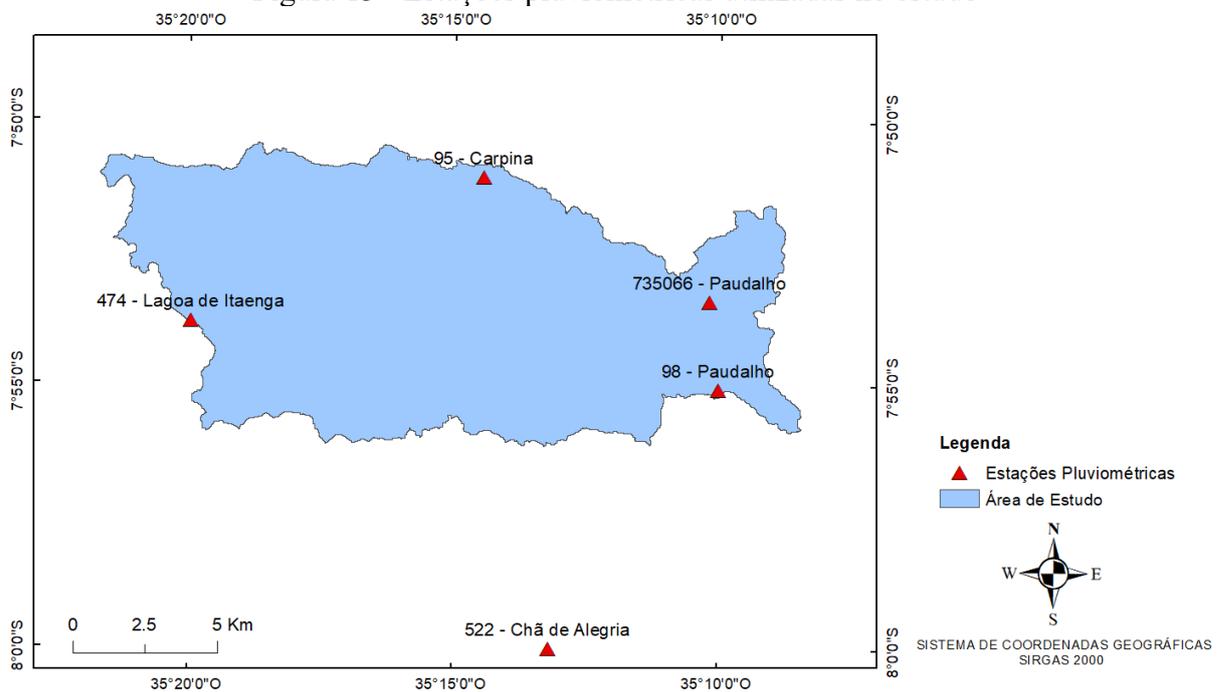
Estação	Tipo	Código	Coordenadas geográficas		Agência
			Lat	Long	
Carpina	Pluviométrica	95	-7,85	-35,24	APAC
Chã de Alegria	Pluviométrica	522	-8,00	-35,22	APAC

Lagoa de Itaenga	Pluviométrica	474	-7,90	-35,33	APAC
Paudalho	Pluviométrica	98	-7,92	-35,17	APAC
Paudalho	Pluviométrica	735066	-7,89	-35,17	ANA

Fonte: A autora (2024).

Foram escolhidas estações localizadas tanto dentro quanto fora da área de interesse, a fim de representar melhor o comportamento pluviométrico na região, conforme mostrado na Figura 13.

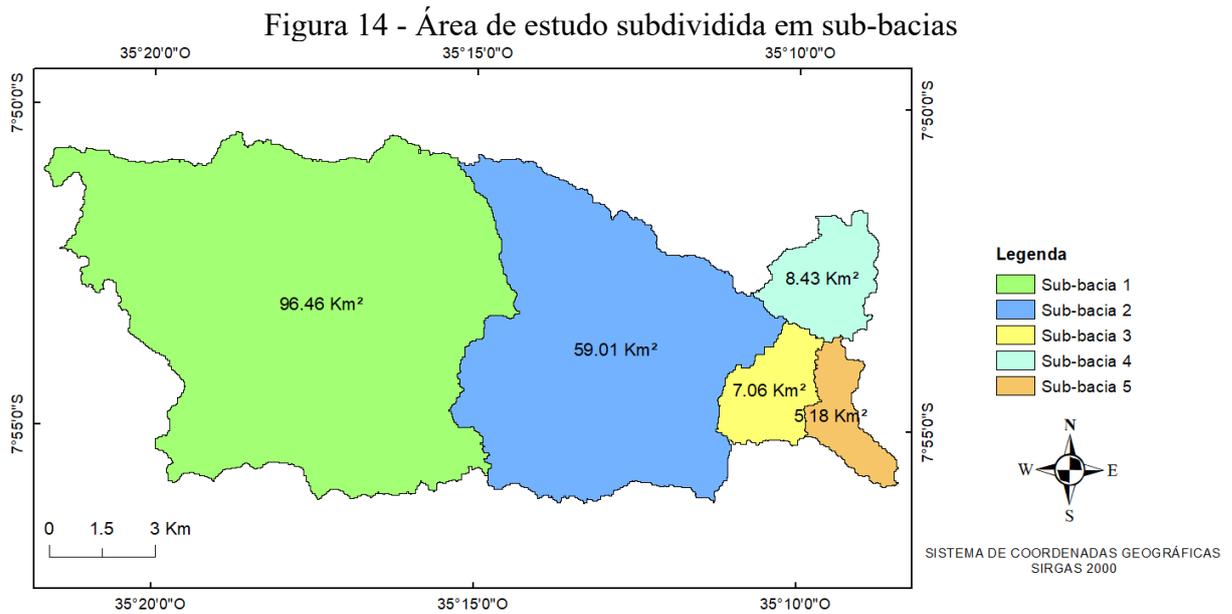
Figura 13 - Estações pluviométricas utilizadas no estudo



Fonte: A autora (2024).

3.5 Delimitação das sub-bacias

A área de estudo foi subdividida no software HEC-HMS em cinco sub-bacias, correspondendo às sub-bacias um, dois, três, quatro e cinco, Figura 14. Sendo assim, a simulação hidrológica foi realizada de forma discretizada, conforme Paz et al. (2011), que afirmam que a discretização em sub-bacias representa melhor a hidrografia de uma região.



3.6 O modelo hidrológico

Esta etapa baseou-se no método SCS para estimar o escoamento superficial e na chuva de projeto, determinada por equações IDF e distribuída temporalmente segundo o método de HUFF (1967), fornecendo subsídios para a modelagem no software HEC-HMS.

3.6.1 Método SCS

Cálculo da curva número (CN)

O número da curva (CN) de cada sub-bacia foi obtido a partir da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, referente ao ano de 2014. Como dado inicial para a geração do mapa CN, foi utilizado o mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil desse mesmo ano. Esse mapa resulta das atividades da Coordenação de Geociências do IBGE, voltadas para o mapeamento sistemático do uso da terra em todo o território brasileiro. Ele é composto por uma grade vetorial quadriculada, onde cada célula abrange uma área de 1 km² (1 km x 1 km), na escala de 1:250.000, totalizando 8.736.375 quadrículas que cobrem todo o país (ANA, 2018).

Assim, foram empregadas ferramentas de geoprocessamento no software QGIS, versão 3.36, para a obtenção dos CNs médios para as sub-bacias, conforme indicado na Tabela 5. O

processo envolveu o recorte dos shapes disponíveis na base da ANA e o cálculo da média ponderada dos valores obtidos.

Tabela 5 - CN médios das sub-bacias

SUB-BACIA	CN_{Médios}
1	79
2	73
3	72
4	83
5	71

Fonte: A autora (2024), com base nos dados da ANA (2018).

Taxa de impermeabilização

Segundo Martins et al. (2018), áreas impermeáveis são aquelas onde a água não se infiltra no solo devido à pavimentação de vias, calçadas, estacionamentos e à construção de edificações como residências, fábricas e armazéns. Dessa forma, a proporção de superfície impermeável é um fator crucial para a análise hidrológica de uma bacia, uma vez que, conforme o autor, essa condição reduz a infiltração no solo e aumenta o escoamento superficial.

Com base na Figura 12, foram calculadas as taxas de impermeabilização das sub-bacias (Tabela 6). O processo utilizou a ferramenta de recorte do software Qgis, versão 3.36, para delimitar e calcular a porcentagem de área urbana em cada sub-bacia.

Tabela 6 - Taxas de impermeabilização

SUB-BACIA	Taxa
1	5,46%
2	5,98%
3	29,49%
4	0,35%
5	2,77%

Fonte: A autora (2024), com base nos dados do MapBiomias (2024).

A Sub-bacia 3 é a que apresenta a maior taxa de impermeabilização, alcançando 29,49%. Essa sub-bacia é notável por concentrar a maior parte do trecho urbano da cidade de Paudalho.

Abstração inicial e infiltração máxima

A infiltração máxima corresponde a parcela da precipitação que infiltra no solo e depende do CN. É dado pela Equação (1):

$$S = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (1)$$

A abstração inicial refere-se à porção da chuva que se infiltra no solo, é interceptada pela vegetação ou acumulada em depressões naturais do terreno (Cunha, 2017). De acordo com Mishra e Singh (1999), essas perdas iniciais representam cerca de 20% da capacidade máxima de armazenamento de água no solo. O método Curva Number considera $\lambda = 0,2$. Desta forma, foi adotada a abstração inicial conforme a Equação (2):

$$\lambda = \frac{I_a}{S} \quad (2)$$

Onde:

I_a é a abstração inicial;

S é a capacidade máxima de armazenamento;

λ índice de abstração inicial.

Tempo De Concentração

O tempo de concentração é definido como o período exigido para que toda a área de uma bacia hidrográfica participe do escoamento superficial na saída de uma determinada seção (Silveira, 2005; Kirpich, 1940).

A equação de Kirpich (1940) é amplamente citada na literatura para calcular o tempo de concentração, tendo sido formulada a partir de estudos realizados em pequenas bacias hidrográficas agrícolas no estado do Tennessee, nos EUA (Mamédio F.M.P. et al., 2018). Segundo Silveira (2005), esta fórmula é recomendada para bacias inferiores a 12.000 km². Sendo assim, para calcular o tempo de concentração tanto da sub-bacia quanto de cada microbacia, foi utilizada a Equação (3):

$$t_c = 57 * \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (3)$$

Onde:

t_c é o tempo de concentração em horas;

L é o comprimento do talvegue em km;

Δh variação de cota entre montante e jusante.

Os valores considerados para o comprimento do talvegue e a variação de cota foram obtidos a partir das características fornecidas pelo software HMS.

LAG-TIME

Segundo Genovez (2001), com base nas análises efetuadas para a elaboração do hidrograma unitário sintético, o SCS definiu o tempo de pico como 0,6 vezes o tempo de concentração (t_c), como apresentado na Equação (4).

$$t_p = 0,6 * t_c \quad (4)$$

Onde:

T_p é o tempo de pico;

T_c é o tempo de concentração.

3.6.2 Chuva de projeto

Equações intensidade-duração-frequência

Além da posição estratégica dos postos, a escolha das estações pluviométricas também considerou a existência de uma curva IDF, que, de acordo com Pruski et al. (2006), é uma equação que caracteriza a precipitação máxima ao relacionar três grandezas: intensidade, duração e frequência.

A Equação (5) apresenta a fórmula usual das equações IDFs. Dessa forma, os parâmetros utilizados (Tabela 7) para o cálculo das intensidades foram obtidas do estudo de Matos (2021), que se dedicou a determinar equações específicas para cada posto analisado na bacia do rio Capibaribe.

$$i = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (5)$$

Onde:

i é a intensidade máxima média, em mm/h;

T é tempo de retorno, em anos;

t é o tempo de duração da chuva, em minutos;

K , a , b e c são os coeficientes locais definidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parametros das equações IDFs

Município	Código	Intervalo	Anos	k	a	b	c	R²	
Paudalho	735066	1968	2018	46	1070,82	0,163	11,83	0,77	0,9995
Lagoa	474	2002	2018	17	915,69	0,155	11,83	0,77	0,9994
Carpina	95	1995	2018	23	1006,18	0,165	11,83	0,77	0,9994
Chã de alegria	522	2002	2018	16	1085,64	0,153	11,83	0,77	0,9995
Paudalho	98	1993	2018	25	1007,11	0,151	11,83	0,77	0,9996

Fonte: Adaptado de Matos (2021).

Além disso, para as simulações foram definidos quatro tempos de retorno e calculada a intensidade de precipitação para uma chuva com 12 horas de duração, como indicado na Tabela 8. O tempo de duração da chuva foi determinado levando em consideração o tempo de concentração da área como um todo, resultando em 11 horas e 42 minutos, sendo considerado 12 horas.

Tabela 8 - Intensidades pluviométricas

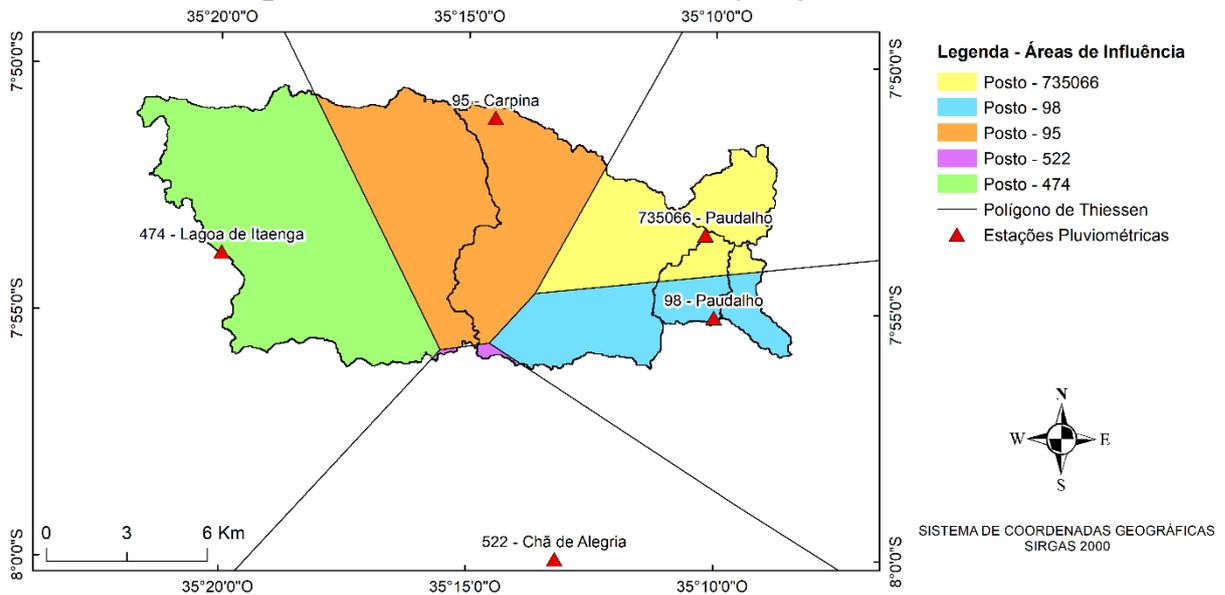
Município	Código	Intensidade total nas 12 horas de duração		
		10 anos	50 anos	100 anos
		Paudalho	735066	116,49
Lagoa	474	97,80	125,51	139,74
Carpina	95	109,97	143,41	160,79
Chã de alegria	522	115,42	147,64	164,16
Paudalho	98	106,58	135,90	150,89

Fonte: Adaptado de Matos (2021).

Polígono de Thiessen

Após a delimitação das sub-bacias e a escolha dos postos, foi determinada a área de influência (Figura 15) de cada um deles. Em seguida, calculou-se a chuva média (Tabela 10) de cada sub-bacia utilizando as frações de influência (Tabela 9). Pedrazzi (1999) menciona três métodos para esse cálculo: o método da média aritmética, o método de Thiessen e o método das isoietas, sendo o de Thiessen, segundo Marciano et al. (2017), o mais amplamente utilizado. Ainda de acordo com o autor, muitos pesquisadores têm empregado o Método de Thiessen (1911) em estudos de recursos hídricos e previsão climática, alcançando resultados satisfatórios.

Figura 15 - Área de influência das estações pluviométricas



Fonte: A autora (2024).

Tabela 9 - Porcentagem de influência de cada posto em cada sub-bacia

SUB-BACIA 1		
Posto	Código	%
Lagoa	474	0.66
Carpina	95	0.33
Chã de alegria	522	0.01
SUB-BACIA 2		
Posto	Código	%
Paudalho	735066	0.28
Carpina	95	0.46
Chã de alegria	522	0.01
Paudalho	98	0.25
SUB-BACIA 3		
Posto	Código	%
Paudalho	735066	0.40
Paudalho	98	0.60
SUB-BACIA 4		
Posto	Código	%
Paudalho	735066	1
SUB-BACIA 5		
Posto	Código	%
Paudalho	735066	0.21
Paudalho	98	0.79

Fonte: A autora (2024).

Tabela 10 - Intensidade média

Intensidade média	TR	TR	TR
	10	50	100
Sub-bacia 1	101,94	131,54	146,83
Sub-bacia 2	110,95	143,75	160,72
Sub-bacia 3	110,61	142,15	158,40
Sub-bacia 4	116,54	151,44	169,55
Sub-bacia 5	108,70	139,16	154,81

Fonte: Adaptado de Matos (2021).

Distribuição temporal da chuva

Abreu et al. (2017) afirmam que o hietograma de projeto é o principal dado de entrada para a modelagem chuva-vazão, sendo essencial para a obtenção do hidrograma simulado. Para isso, é necessário distribuir os valores da precipitação discretizados ao longo do período escolhido, de forma que cada intervalo de tempo do hietograma seja adequadamente preenchido.

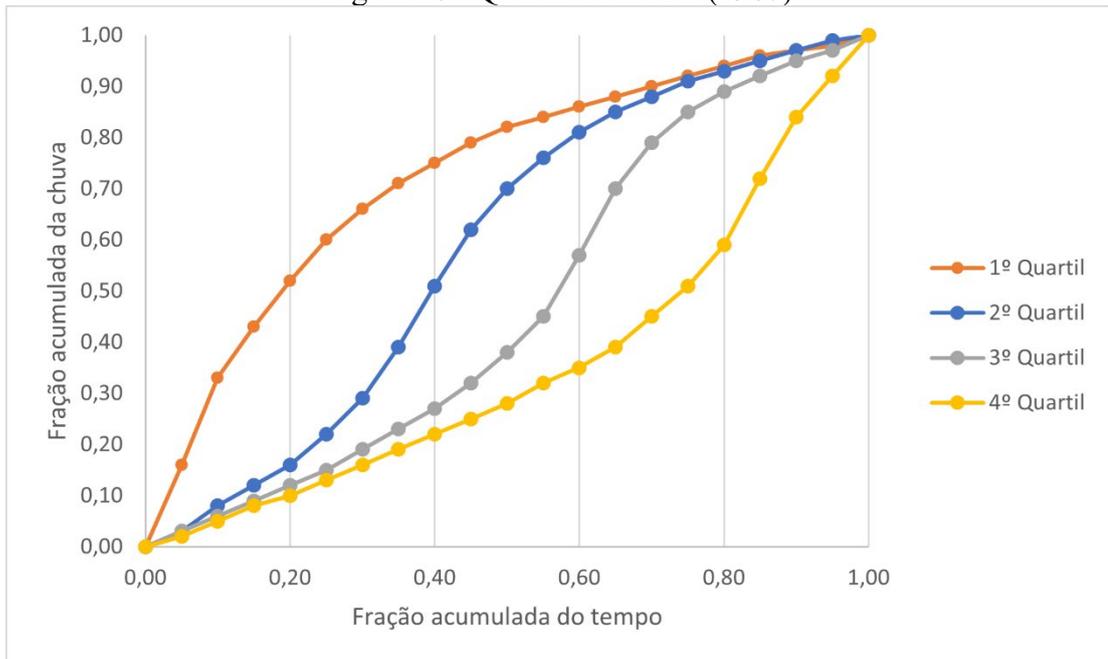
Ainda segundo o autor, esse hietograma descreve a distribuição temporal de um evento de precipitação, sendo de grande importância para a modelagem, pois influencia diretamente tanto a forma quanto o pico do hidrograma resultante. Como a distribuição temporal da chuva geralmente é desconhecida e pode variar em função do espaço, do tempo e do tipo de precipitação, é comum adotar distribuições empíricas que tentam representar as condições mais críticas possíveis.

Huff (1967) conduziu um estudo sobre a distribuição temporal de chuvas intensas, que se tornou uma referência amplamente utilizada em diversos países. Nesse estudo, o autor introduziu o conceito de uma curva adimensional, que relaciona a chuva acumulada com a duração da precipitação, também de forma adimensional (Pereira et al., 2013).

Nesse método foram realizadas 3 distribuições de chuvas, onde cada uma delas é conhecida como quartil. O primeiro quartil é utilizado para chuvas com durações menores que 6 horas; o segundo para chuvas entre 6 e 12 horas de duração; o terceiro para chuvas maiores que 12 e menores que 24 horas; enquanto o quarto é utilizado para chuvas maiores que 24 horas de duração.

O método de distribuição adotado foi o método do segundo quartil de Huff para a probabilidade de ocorrência de 50%, já que a duração da chuva adotada foi de 12 horas, cujos quartis podem ser vistos na Figura 16.

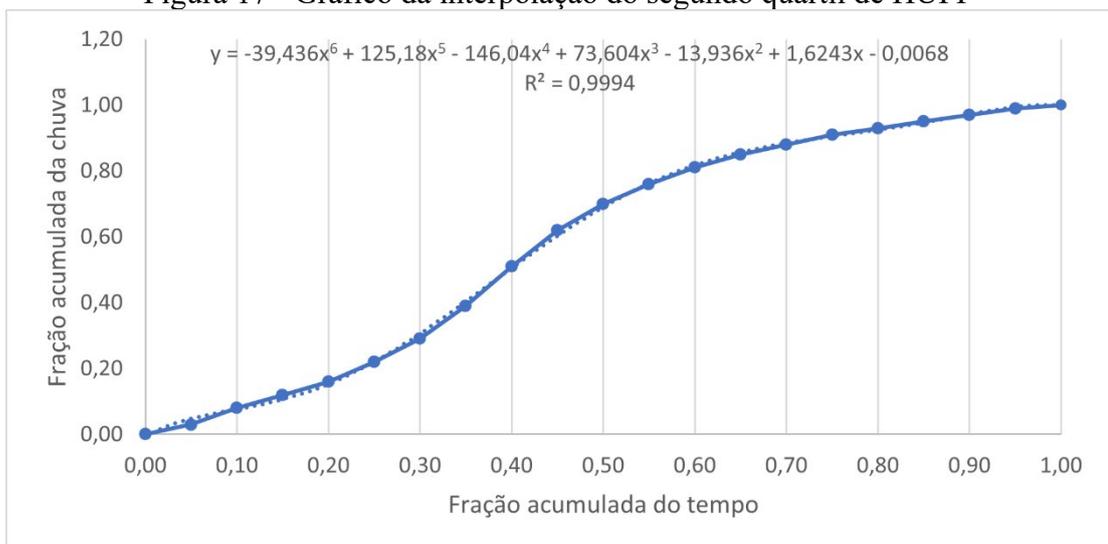
Figura 16 - Quartis de HUFF (1967)



Fonte: Adaptado de HUFF (1967).

Utilizando a distribuição com os intervalos definidos por HUFF (1967), o intervalo da chuva de projeto foi de 36 minutos. Como esse intervalo não está disponível no HEC-HMS, foi necessário realizar uma interpolação da curva de HUFF (1967) segundo quartil, Figura 17. Com isso, foi possível obter uma distribuição aproximada com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9994.

Figura 17 - Gráfico da interpolação do segundo quartil de HUFF



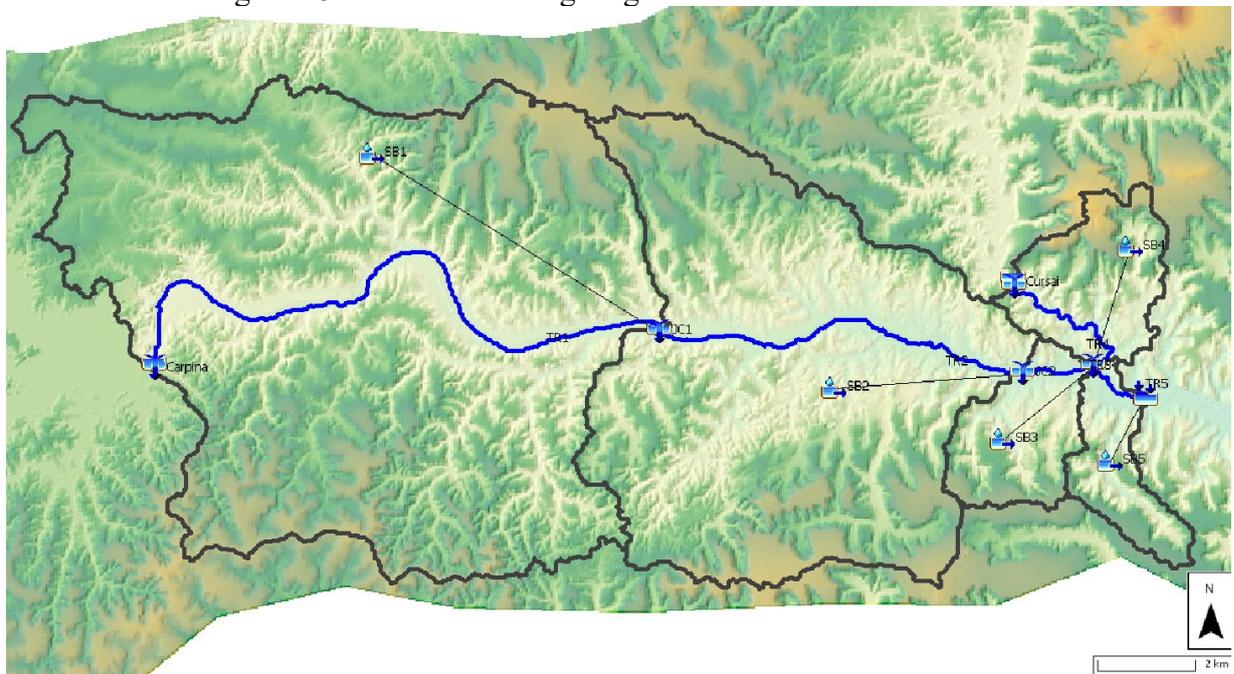
Fonte: A autora (2024).

As distribuições das cinco sub-bacias estão no apêndice A. A precipitação total foi determinada com base na média ponderada das áreas de influência de cada estação, utilizando o método do polígono de Thiessen, como descrito na seção anterior.

3.6.3 HEC-HMS

O modelo hidrológico, mostrado na Figura 18 foi gerado no software HEC-HMS, para o cálculo dos hidrogramas de projeto.

Figura 18 - Modelo hidrológico gerado no software HEC-HMS



Fonte: A autora (2024).

Dados de entrada

Os dados inseridos no software para a geração dos hidrogramas de projeto (Tabela 11) incluem o CN, a taxa de impermeabilização, a abstração inicial e o tempo de retardo (lag-time) de cada sub-bacia. Além disso, foram consideradas as chuvas de projeto correspondentes a cada sub-bacia, de acordo com os diferentes cenários.

Tabela 11 - Dados de entrada no modelo HEC-HMS

SUB-BACIA	Dados de entrada			
	CN	Taxa de impermeabilização	Abstração inicial (mm)	Lag-time (min)
1	79	5,46%	13,50	175,82
2	73	5,98%	18,79	113,11
3	72	29,49%	19,76	38,65
4	83	0,35%	10,40	43,49
5	71	2,77%	20,75	40,28

Fonte: A autora (2024).

Os hidrogramas serão apresentados com uma duração total de 27 horas, permitindo identificar as fases de ascensão e descensão da curva. Como a chuva teve uma duração total de 12 horas, nas 15 horas restantes foram consideradas apenas as vazões provenientes das barragens.

3.7 Modelo hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico o software utilizado foi o HEC-RAS.

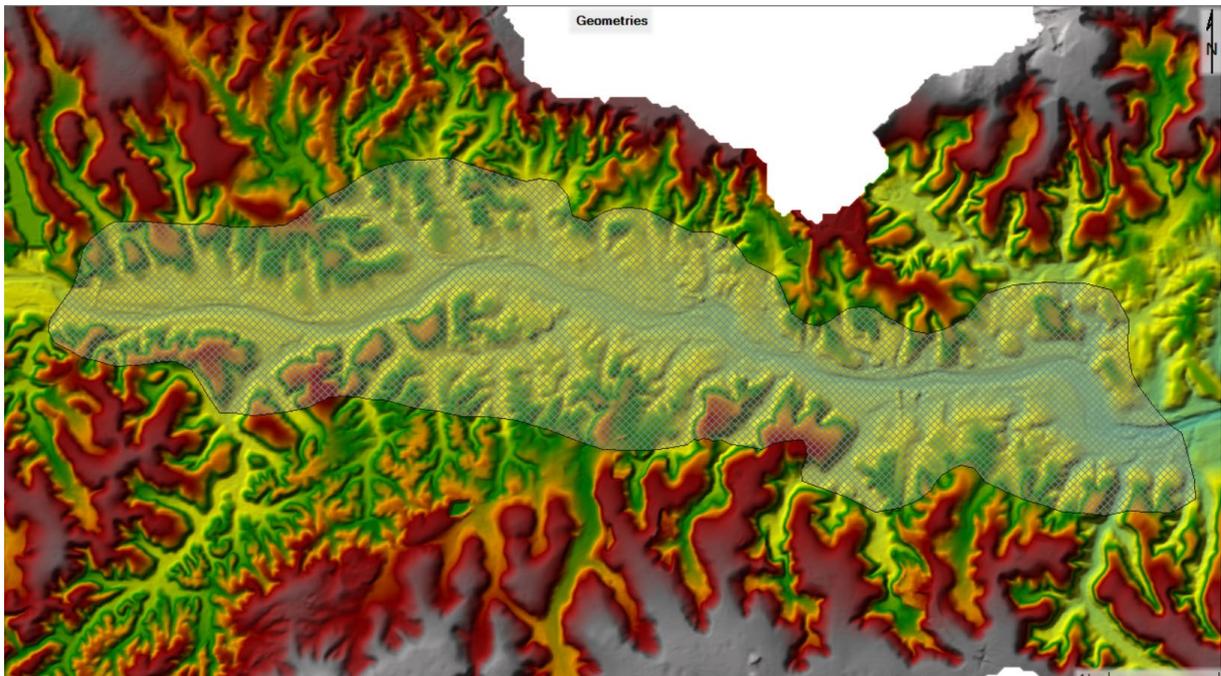
3.7.1 Geometria do modelo

Para a construção da geometria do modelo hidrodinâmico, foi utilizada uma malha bidimensional 25x25m (Figura 19) sobre o Modelo Digital do Terreno (MDT), abrangendo desde o limite inicial do município até o limite de vulnerabilidade a inundações definido pela ANA (2012) na cidade de Paudalho. A escolha da malha foi adotada com base no mesmo padrão utilizado por Motta et al. (2023) que elaborou manchas de inundação para o município de Nova Era no estado de Minas Gerais.

Para a região da calha principal do rio e suas proximidades, foi realizado o refinamento da malha, como mostrado na Figura 20, ou seja, foi realizada a redução do tamanho das células para 10x10m, conforme também adotado por Verçosa (2019) que elaborou manchas de inundação para a cidade Recife em Pernambuco.

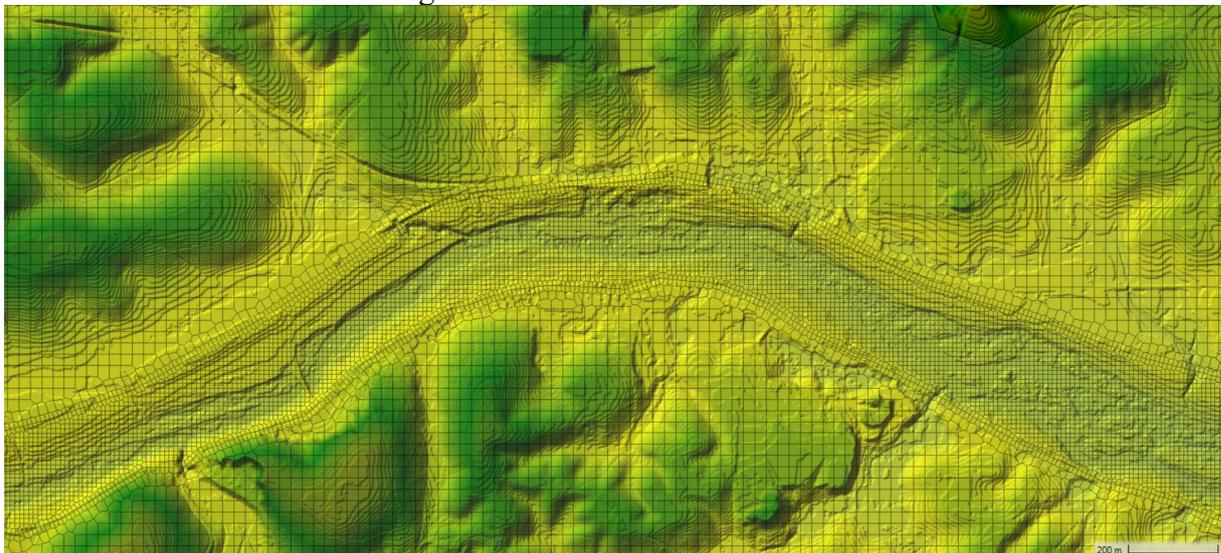
Esse procedimento, de acordo com Verçosa (2019) e Rodrigues (2021), orienta o escoamento e aumenta a precisão do modelo. Com essa geometria, a malha resultou num total de 54822 número de células.

Figura 19 - Malha gerada no software HEC-RAS.



Fonte: A autora (2024).

Figura 20 - Refinamento da malha



Fonte: A autora (2024).

3.7.2 Coeficiente de Manning

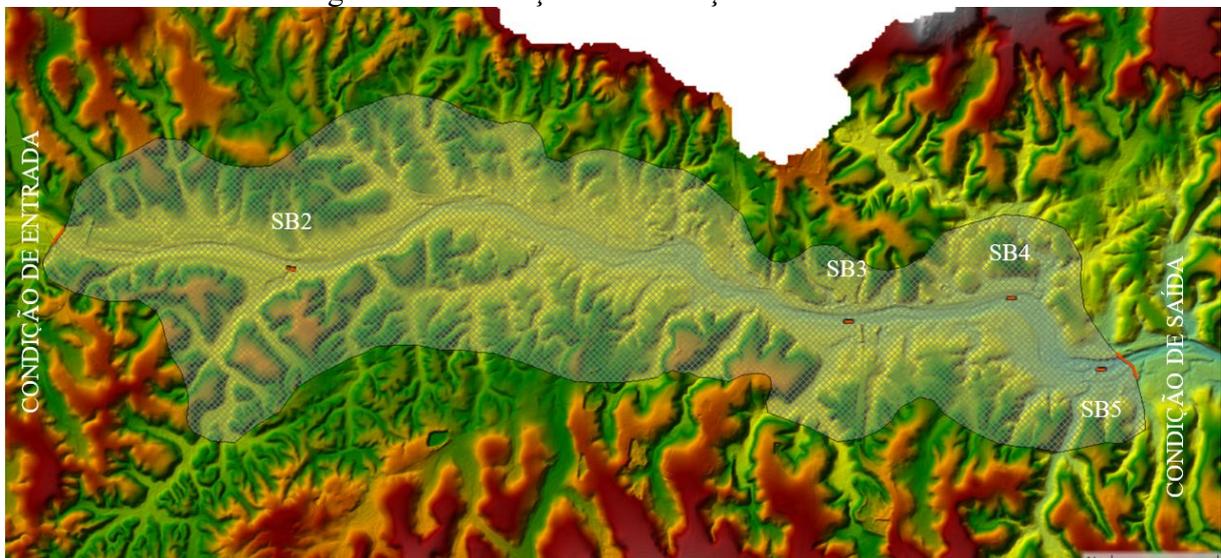
O coeficiente de Manning, que representa o parâmetro de atrito, foi adotado como 0,035, conforme Lambert (2021), que elaborou mapas de inundação das áreas potencialmente

inundáveis a jusante da barragem de Carpina no caso do seu rompimento. Dessa forma, foi considerado um valor único para toda a malha. No entanto, conforme Barros (1979) e Alcoforado e Cirilo (2001), esse valor no rio Capibaribe pode variar entre 0,03 e 0,035.

3.7.3 Condições de contorno

As condições de contorno internas e externas à malha foram definidas após sua criação (Figura 21). As condições externas foram alocadas nas seções mais à jusante e à montante da malha. Na seção à montante, foi estabelecido o hidrograma de saída da bacia 1 como condição de contorno, sendo essa bacia desconsiderada na simulação hidrodinâmica por estar à montante da cidade de Paudalho. Além disso, foi considerada uma declividade inicial de 1,58%, obtida com o uso de ferramentas do Civil 3D. Para a condição de contorno à jusante, foi adotada a profundidade normal, e a declividade foi estimada em 6,8% ao longo de um trecho de 10 metros. Quanto às condições internas da malha, foram inseridos os hidrogramas das outras quatro sub-bacias.

Figura 21 - Indicação das condições de contorno



Fonte: A autora (2024).

3.7.4 Simulação

As simulações foram realizadas utilizando a equação da onda difusa, aplicada ao escoamento não-permanente bidimensional disponibilizado pelo software (Magalhães, 2023).

O intervalo computacional adotado para as simulações foi de 30 segundos, enquanto os resultados foram gerados em intervalos de 1 minuto.

3.8 Cenários Adotados

Os cenários adotados para as simulações foram definidos com base em condições que permitem avaliar diferentes situações de operação das barragens e eventos hidrológicos extremos, com o objetivo de prever possíveis impactos no município de Paudalho. O Cenário 1 considera a barragem de Carpina em condições normais de operação, com vazão regularizadora ($Q_{100} = 1,69 \text{ m}^3/\text{s}$) e uma chuva de projeto de período de retorno de 10 anos. Esse cenário reflete a operação habitual da barragem e é essencial para identificar as áreas mais vulneráveis da cidade.

O Cenário 2 simula a abertura total das comportas da barragem de Carpina, combinada com uma chuva de projeto de 50 anos. Esta situação atípica, embora rara, pode ser necessária em casos de risco elevado de alagamento ou transbordamento. O objetivo é analisar os efeitos de uma operação crítica da barragem e suas consequências para Paudalho, especialmente em relação às áreas mais suscetíveis.

No Cenário 3, o vertimento é de $1.118 \text{ m}^3/\text{s}$, combinado com uma chuva de projeto de 100 anos, representando um evento extremo. Esse cenário é crucial para entender os impactos de precipitações severas e operações excepcionais, sendo fundamental para o planejamento de estratégias de mitigação e segurança.

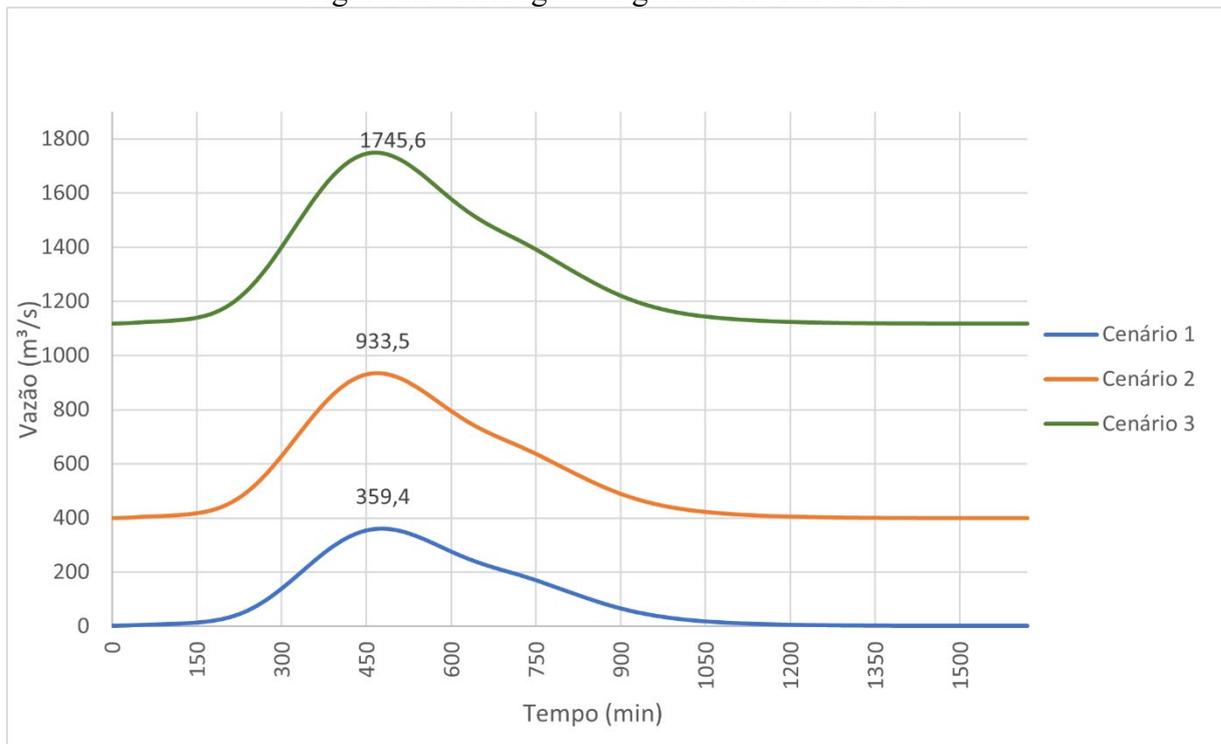
Para todas as simulações, a vazão liberada pela barragem do Cursaí foi mantida constante, sendo considerado o vertimento médio de 217 L/s .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Hidrogramas

Hidrogramas foram gerados através de simulações hidrológicas no software HEC-HMS, utilizando hidrogramas (Apêndice A) referentes aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos, com uma duração de 12 horas. Os hidrogramas em forma de gráfico com seus respectivos picos podem ser vistos na Figura 22, já os hidrogramas gerados por cada sub-bacia pode ser visto no Apêndice B. Para o cenário 1 foi obtido uma vazão de pico de 359,4 m³/s, para o cenário 2, uma vazão de 933,5 m³/s, enquanto para o último cenário uma vazão de 1745,6 m³/s.

Figura 22 - Hidrogramas gerados no HEC-HMS



Fonte: A autora (2024).

4.2 Manchas de inundação

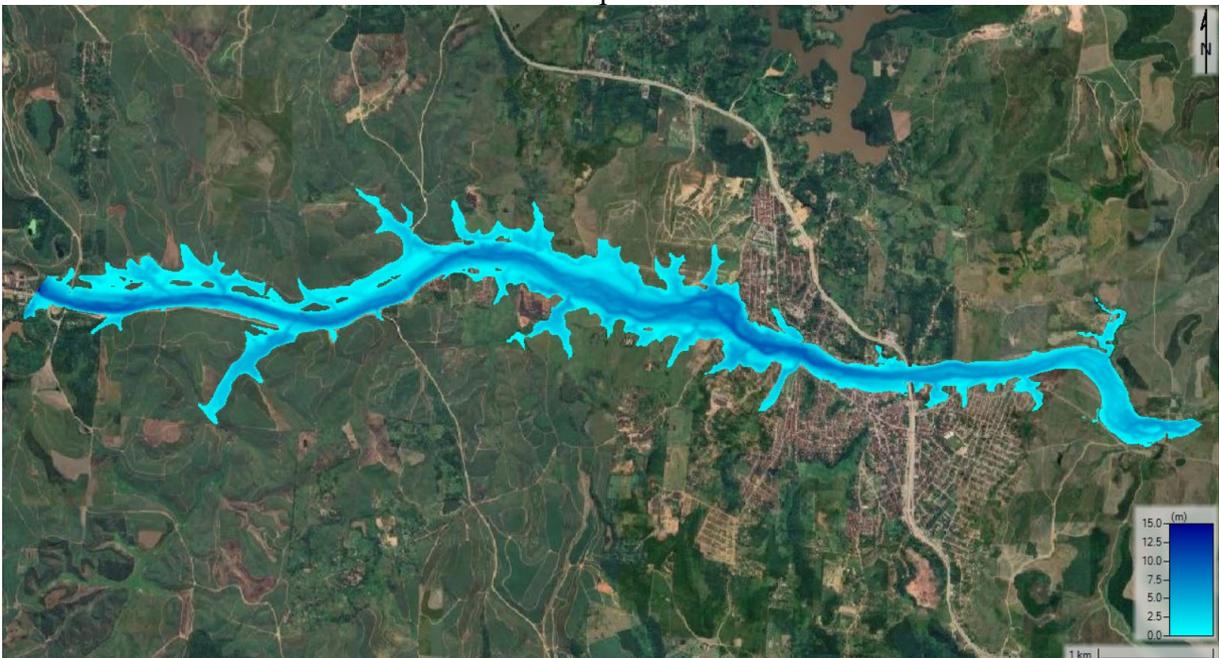
Na etapa de simulação hidrodinâmica, identificaram-se as manchas de inundação para os diferentes cenários, permitindo a visualização das áreas afetadas em cada um.

Figura 23 - Mancha de inundação para precipitação com T_r de 10 anos com barragem em condições normais de operação



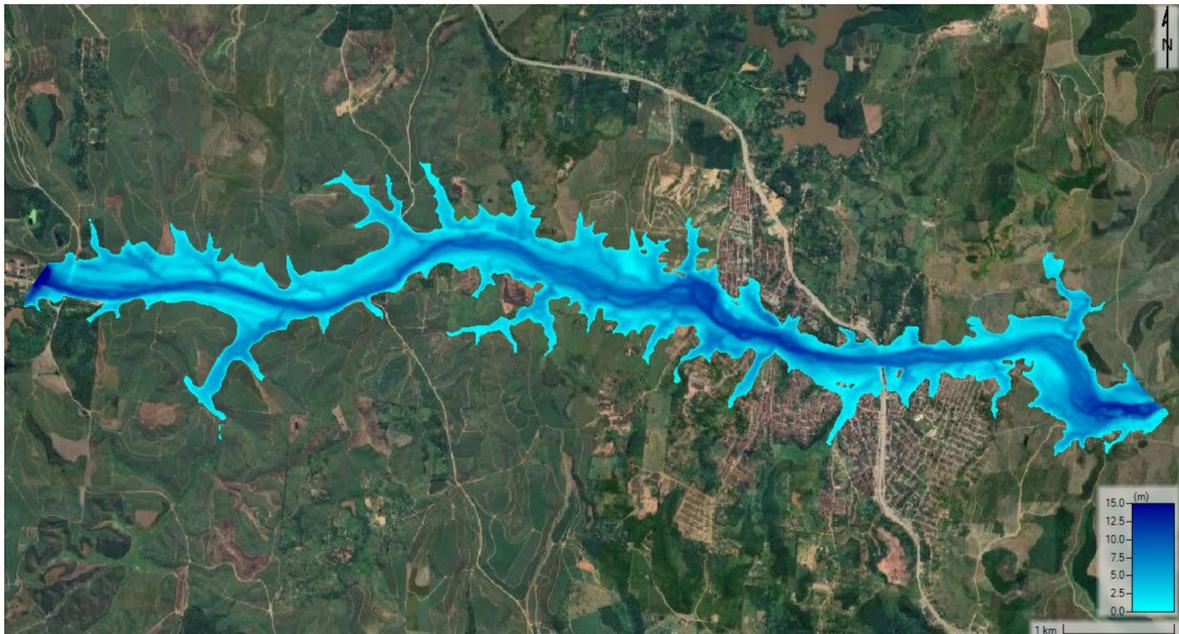
Fonte: A autora (2024).

Figura 24 - Mancha de inundação para precipitação com T_r de 50 anos com abertura total das comportas



Fonte: A autora (2024).

Figura 25 - Mancha de inundação para precipitação com Tr de 100 anos com barragem vertendo



Fonte: A autora (2024).

Observa-se que, no primeiro cenário (Figura 23), a mancha de inundação permanece predominantemente dentro da calha do rio, com poucos trechos apresentando extravasamento. A vazão de pico de 359,4 m³/s foi capaz de inundar uma área de 1,49 km² como observado na Tabela 12, delimitando uma zona de alagamento relativamente contida e as profundidades variando entre 0 e 5 metros.

No entanto, nos cenários seguintes, ocorre extravasamento mais amplo para a planície de inundação. Ao atingir uma vazão de 933,5 m³/s, a área inundada se expandiu significativamente, alcançando 4,15 km² e demonstrando um aumento expressivo no impacto da cheia sobre a região (Figura 24). As profundidades alcançam entre 5 e 10 metros.

Por fim, com a vazão máxima de 1.745,6 m³/s, o cenário 3 (Figura 25) se torna ainda mais crítico, ampliando a área alagada para 6,10 km², o que reflete uma maior abrangência dos efeitos da inundação em áreas urbanas e rurais adjacentes. a profundidade da calha do rio ultrapassa 12 metros na maior parte dos trechos.

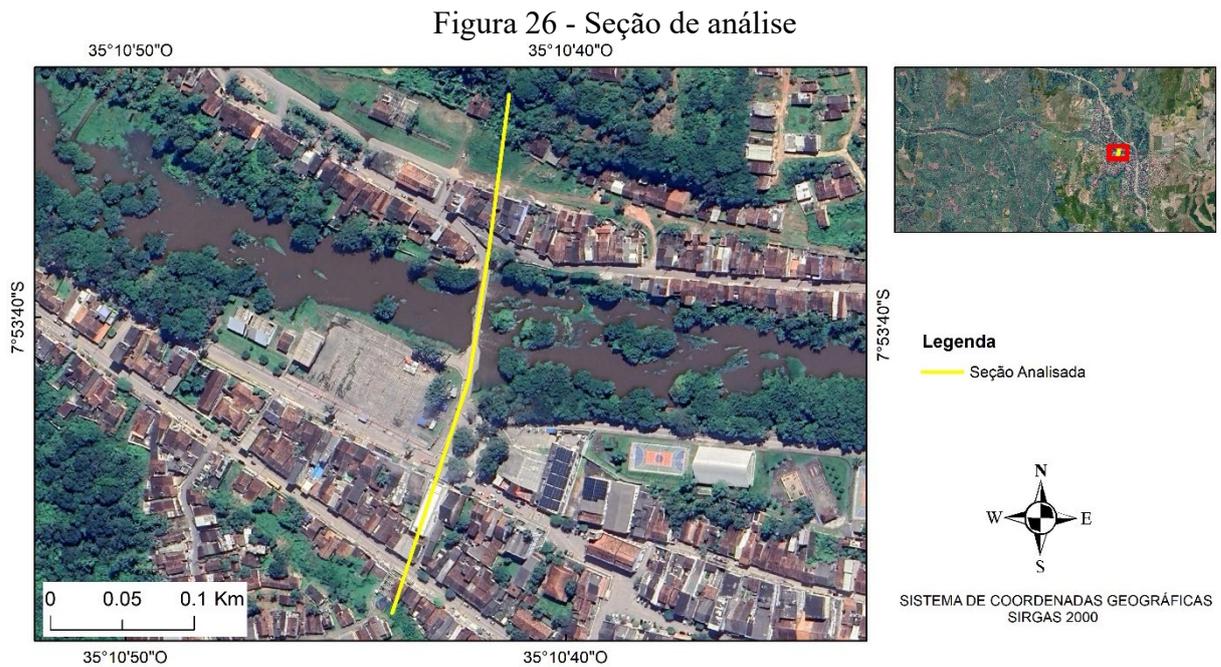
Tabela 12 - Áreas afetadas
Área de inundação (km²)

Cenário 1	1,49
Cenário 2	4,15
Cenário 3	6,10

Fonte: A autora (2024).

4.3 Altura das lâminas na seção próxima à ponte do Beira Rio

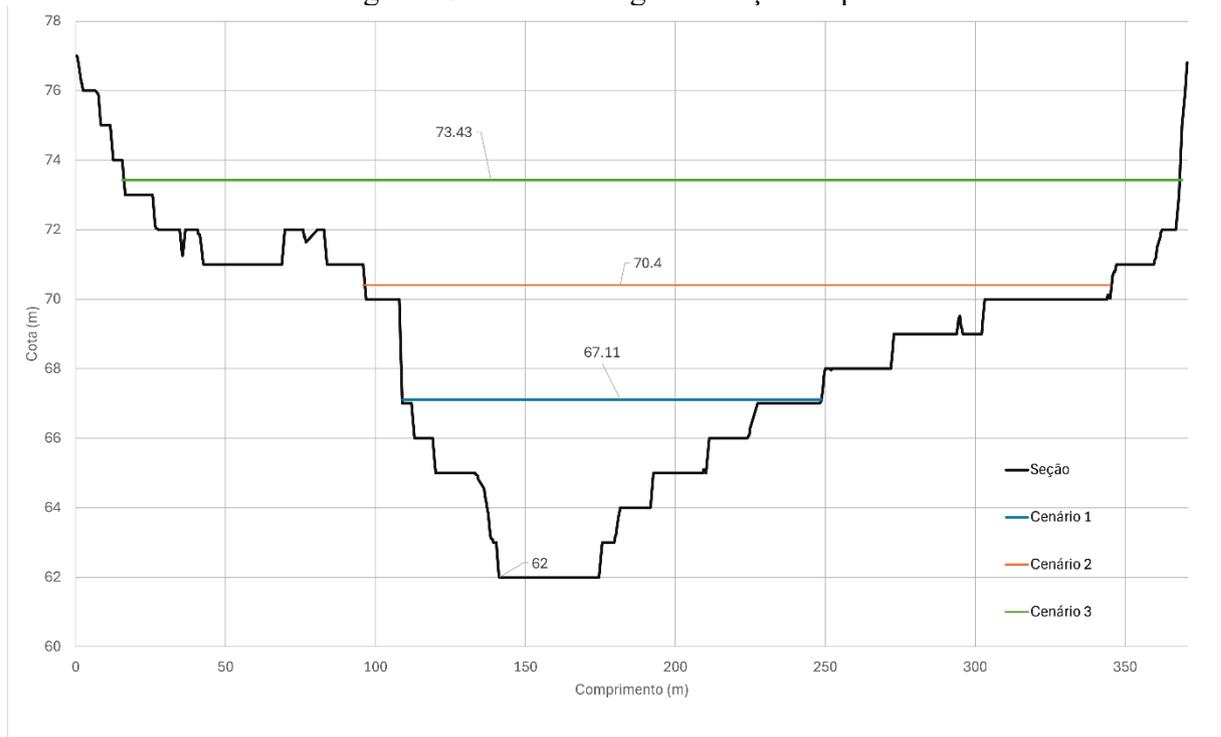
A Seção de análise apresentada na Figura 26 está localizada cruzando às margens do Rio Capibaribe, estabelecida aproximadamente sob a ponte do Beira Rio.



Fonte: A autora (2024).

A Figura 27, por sua vez, apresenta a altura da lâmina de água para essa seção, considerando os diferentes cenários de vazão analisados.

Figura 27 - Lâmina d'água na seção da ponte



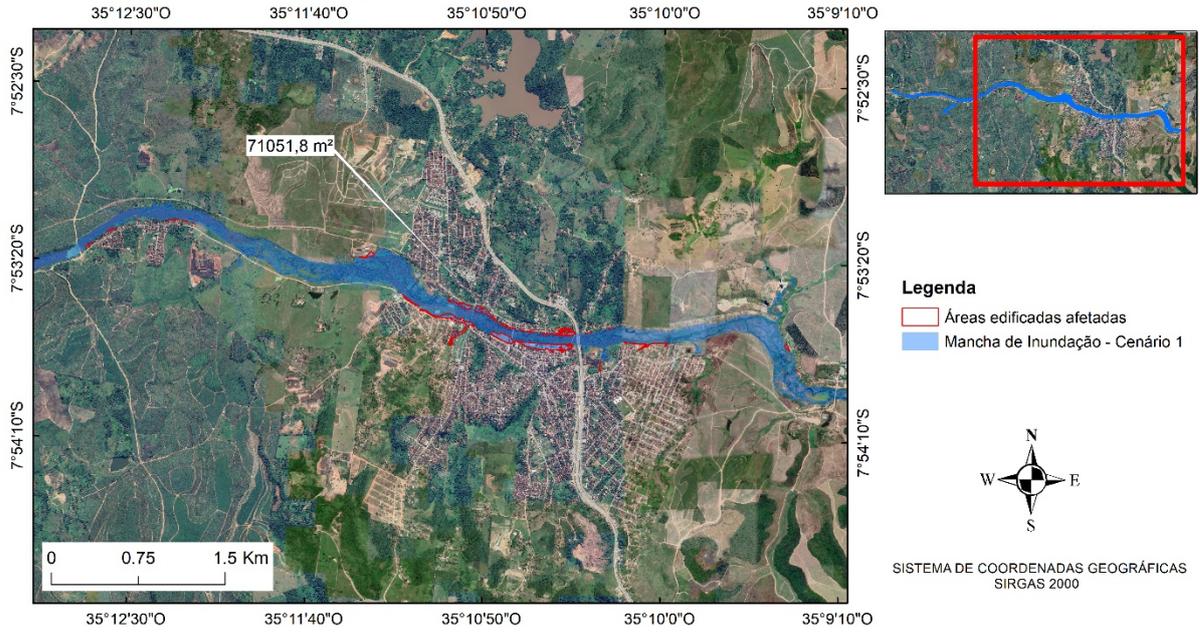
Fonte: A autora (2024).

No primeiro cenário analisado, a altura da lâmina d'água atingiu 5,11 metros, enquanto no cenário intermediário essa altura aumentou para 8,40 metros, representando um acréscimo de aproximadamente 164,38%. No cenário mais intenso, a lâmina d'água alcançou 11,43 metros, um aumento de cerca de 223,68% em relação ao cenário inicial. Esses percentuais evidenciam o crescimento substancial das alturas da lâmina d'água à medida que as condições se tornam mais severas, indicando o risco crescente associado às maiores vazões de pico.

4.4 Áreas edificadas afetadas

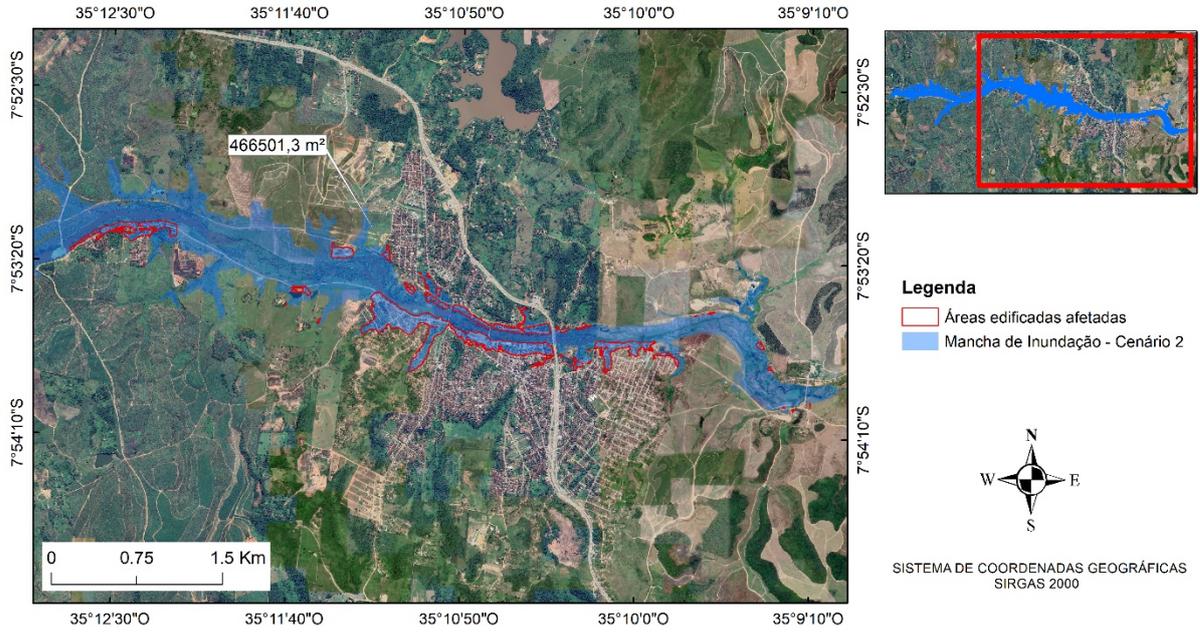
Em relação às áreas edificadas afetadas, a área impactada passou de 71051,8 m² no primeiro cenário (Figura 28) para 466501,3 m² no segundo (Figura 29), representando um aumento de aproximadamente 7 vezes. Já no terceiro cenário (Figura 30), a área afetada foi de 860770,3 m², cerca de 12 vezes maior que a do primeiro. Esses dados destacam a expansão expressiva dos impactos em áreas urbanas e rurais edificadas sob cenários mais extremos, refletindo uma vulnerabilidade crescente das regiões expostas.

Figura 28 - Áreas afetadas para o cenário 1



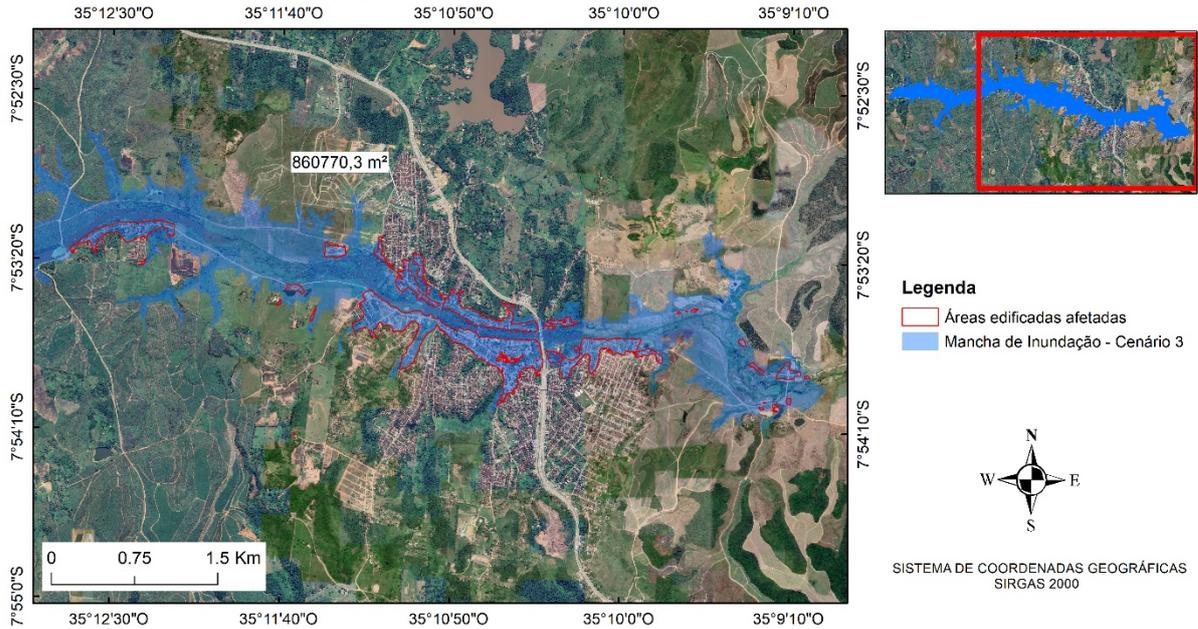
Fonte: A autora (2024).

Figura 29 - Áreas afetadas para o cenário 2



Fonte: A autora (2024).

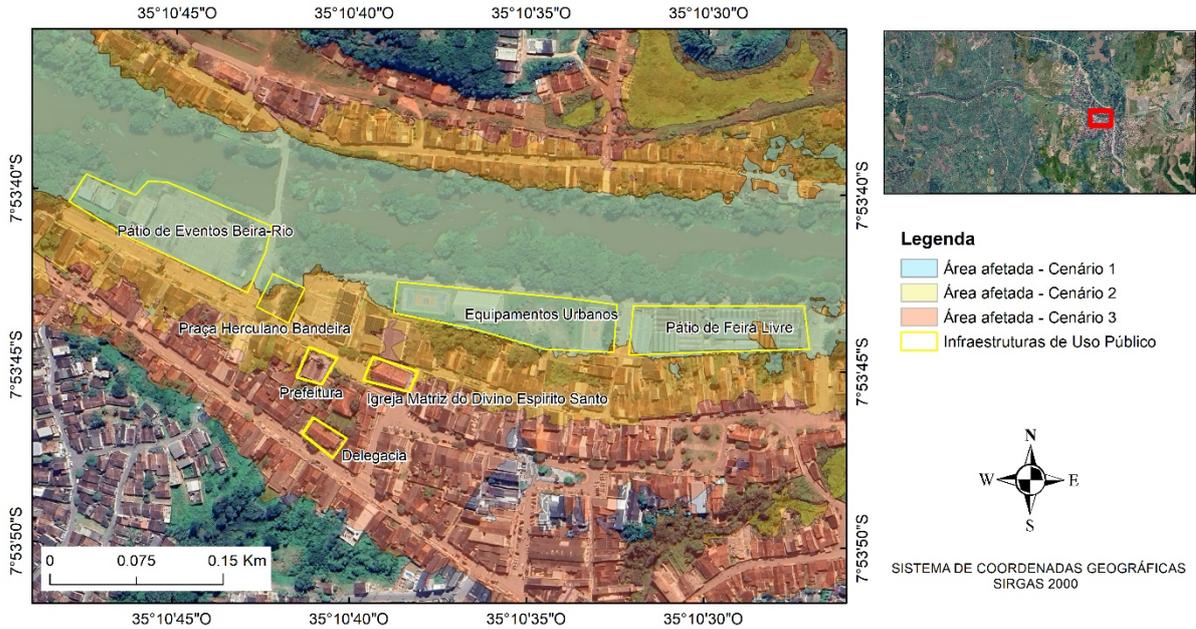
Figura 30 - Áreas afetadas para o cenário 3



Fonte: A autora (2024).

No cenário 1, infraestruturas urbanas já seriam afetadas, como o pátio de eventos Beira-Rio, o pátio de feira livre, e equipamentos urbanos que estão localizadas às margens do Rio. No segundo, a Praça Herculano Bandeira, importante espaço público da cidade, também seria afetada, prejudicando as opções de lazer e convivência social para a população. No terceiro, áreas com a Prefeitura Municipal, a principal igreja e a delegacia, essenciais para a administração e segurança, também seriam afetadas, comprometendo serviços fundamentais à população, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 - Infraestruturas de Uso público afetadas em cada cenário

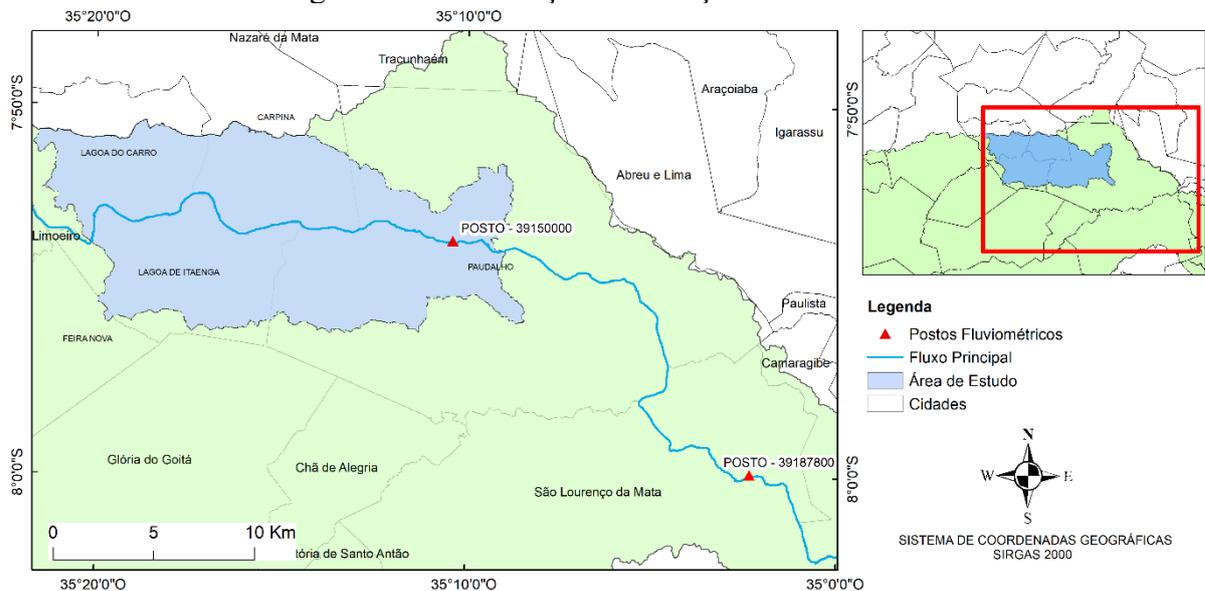


Fonte: A autora (2024).

4.5 Verificação da ordem de grandeza das vazões geradas pelo modelo hidrológico

As vazões obtidas pelas simulações foram comparadas com vazões registradas em dois postos localizados no Rio Capibaribe (Figura 32). O primeiro posto fluviométrico é o da cidade de Paudalho (39150000) de coordenadas 7,9° S e 35,17° W. Já o segundo é o da cidade de São Lourenço da Mata (39187800) sob coordenadas 8° S e 35,04° W.

Figura 32 - Localização das estações fluviométricas



Fonte: A autora (2024).

A análise comparativa entre as vazões geradas pelo modelo hidrológico e os dados registrados nos postos fluviométricos demonstra uma boa correspondência, indicando a consistência do modelo em reproduzir os eventos hidrológicos históricos.

No Cenário 1, o pico de vazão gerado pelo modelo foi de 359,4 m³/s, valor bastante próximo às vazões históricas registradas no posto fluviométrico de Paudalho em 01/03/1969 (329,17 m³/s) e em 01/08/1970 (404,28 m³/s). Adicionalmente, essa vazão gerada apresenta boa proximidade com os registros do posto de São Lourenço da Mata, como observado em 01/07/2015 (304,95 m³/s), 01/07/2011 (311,04 m³/s) e 01/06/2010 (400,4 m³/s). Esses resultados indicam que o modelo hidrológico é capaz de capturar vazões de magnitude semelhante às ocorrências históricas para eventos dessa ordem de grandeza.

No Cenário 2, a vazão gerada pelo modelo de 933,5 m³/s mantém-se consistente ao ser comparada aos dados históricos. Nesse caso, o modelo gerou uma vazão de magnitude próxima à registrada no posto de Paudalho, em 01/05/1977 (962,31 m³/s). Essa comparação reforça que o modelo pode replicar eventos de maior intensidade e corresponde às tendências hidrológicas observadas na região.

Por fim, no Cenário 3, a vazão gerada foi de 1745,6 m³/s, representando um evento extremo. Apesar de maior que os registros históricos analisados, essa vazão apresenta uma ordem de grandeza comparável à maior vazão registrada no posto de São Lourenço da Mata, em 01/07/1990 (1048,58 m³/s). A diferença indica a intensidade do evento simulado, que pode representar um cenário de extremo, mas ainda coerente com os padrões históricos em termos de magnitude.

Essas análises demonstram que o modelo hidrológico construído, mesmo não sendo efetuada a calibração dos parâmetros considerados, apresenta coerência e é capaz de gerar vazões que, mesmo em diferentes cenários, apresentam proximidade com dados históricos registrados. Isso evidencia a adequação do modelo para simular eventos críticos e estimar impactos hidrológicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente estudo teve como objetivo principal o mapeamento das manchas de inundação associadas aos diferentes cenários de precipitação e vazões liberadas pelas barragens, com a finalidade de avaliar os impactos das inundações na região analisada. Através das simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, foi possível identificar as áreas mais suscetíveis à inundação, bem como as variações nas profundidades das águas e os efeitos sobre as infraestruturas.

Com os hidrogramas gerados pelo software HEC-HMS, foram observadas as vazões de pico nos três cenários: no cenário 1, a vazão foi de 359,4 m³/s; no cenário 2, a vazão aumentou para 933,5 m³/s; e no cenário 3, a vazão atingiu 1.745,6 m³/s.

A análise das manchas de inundação revelou uma ampliação das áreas afetadas conforme a intensidade das precipitações e as vazões aumentavam. No cenário 1, a mancha de inundação se manteve dentro da calha do rio, afetando uma área relativamente pequena, de 1,49 km². No cenário 2, a área alagada aumentou para 4,15 km², com significativa expansão para a planície de inundação. Já no cenário 3, a área afetada alcançou 6,10 km², refletindo impactos mais severos nas áreas urbanas e rurais adjacentes.

A análise das lâminas d'água também mostrou um aumento progressivo das cotas de inundação: 67,11 metros no cenário 1, 70,40 metros no cenário 2, e 73,43 metros no cenário 3. Esses resultados indicam o crescente risco de inundações à medida que as vazões aumentam.

Além disso, no cenário 1, observou-se a vulnerabilidade das áreas localizadas às margens do Capibaribe, evidenciando o risco de alagamento mesmo com chuvas de menor intensidade. Isso destaca a necessidade de medidas preventivas, principalmente em infraestruturas próximas ao leito do rio, como a Ponte do Beira Rio e o Pátio de Eventos.

Nos três cenários, os impactos sobre os lotes edificadas aumentaram significativamente. No cenário 1, com 71051,8 m² impactados, já foi possível observar os primeiros efeitos sobre áreas edificadas. No cenário 2, a área afetada subiu para 466501,3 m², e no cenário 3, alcançou 860770,3 m², afetando áreas essenciais para a cidade, como a Prefeitura e a delegacia. Esses dados reforçam a crescente vulnerabilidade das áreas habitadas e a necessidade de estratégias de mitigação.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

- Sugere-se realizar a simulação incluindo a batimetria na calha do rio, a fim de garantir maior precisão na representação da profundidade do leito do rio.
- Não foram realizadas análise de sensibilidade do coeficiente de Manning, visto que foi adotado um coeficiente único e inicial de 0,035. Nesse contexto, sugere-se a realização dessa análise de sensibilidade, bem como a calibração do coeficiente, a partir de eventos observados.
- Sugere-se avaliar o impacto de uma discretização espacial mais detalhada das sub-bacias nos resultados do modelo hidrológico.

REFERENCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 239-250, 2017.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing. **Geomorphology**, v. 47, p. 107-124, 2002.
- ALCOFORADO, R. G.; CIRILO, J. A. Sistema de Suporte à Decisão para Análise, Previsão e Controle de Inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p.133-153, 2001.
- ALVES, Fellipe Henrique Borba. **Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- AMANTE, F. O. **A água no espaço urbano: uma abordagem sócio-ambiental e sua aplicação à Grande Tijuca – Rio de Janeiro (RJ)**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundações e enchentes. In: TOMINAGA, L. D.; SANTORO, J.; AMARAL, R (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. cap. 3, p. 39-52.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. p. 20, 2014. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/> Acesso em: 01 jul, 2024.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações: Pernambuco. 2012. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/> Acesso em: 10 mar, 2024.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Catálogo de metadados da ANA. 2018. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/> Acesso em: 23 mar. 2024.
- ANA. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. 2011. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 27 out. 2024.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Ficha técnica de Carpina com cota e volume. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br>. Acesso em: 23 set. 2024.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Ficha técnica do Cursai com cota e volume. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br>. Acesso em: 23 set. 2024.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/> Acesso em: 06 ago, 2024.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Protocolo para operação dos sistemas de controle de cheias das bacias hidrográficas do Rio Capibaribe e Una “Período Chuvoso”, 2024.** [documento não publicado]. Acesso em: 15 ago. 2024.

ARAGÃO, JPG de V.; GOMES, ETA. Margens do rio Capibaribe na (re) produção do urbano em cidades pequenas: vulnerabilidades e formas de ocupação e uso. **ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS**, v. 18, 2016.

ARAÚJO, JUNINHO. Enchente Paudalho 2011. Youtube, 05 maio 2011. Disponível em: www.youtube.com. Acesso em: 10 de out, 2024.

BARROS, M. C. **Verificação do grau de proteção do plano de controle de enchentes do Governo Federal, Bacia do Rio Capibaribe PE-BR.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Hidrologia Aplicada) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

BLOG DO AGRESTE. PE-50 continua interditada na Ponte do Cumbe. Barragem de Carpina recebeu grande volume d'água. Disponível em: <https://blogdoagreste.blogspot.com/>. Acesso em: 10 de nov, 2024.

BOZZA, A.; DURAND, A.; CONFORTOLA, G.; SONCINI, A.; ALLENBACH, A.; BOCCHIOLA, D. Potential of remote sensing and open street data for flood mapping in poorly gauged areas: a case study in Gonaives, Haiti. **Applied Geomatics**, v. 8, n. 2, p.117-131, 2016.

BRAGA, J. O. **Alagamentos e Inundações em Áreas Urbanas: Estudo de Caso na cidade de Santa Maria- DF.** TCC, Curso de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** In CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. Gerenciamento de áreas de risco: medidas estruturais e não estruturais. Brasília: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p. 125-139, 2007.

CBN RECIFE. Após vistoria técnica, trecho entre Limoeiro e Feira Nova é liberado; ponte ficou inundada por causa de barragem. CBN Recife, 20 jul. 2023. Disponível em: <https://www.cbnrecife.com> Acesso em: 08 nov. 2024.

CHORMANSKI, J.; OKRUSZKO, T.; IGNAR, S.; BATELAAN, O.; REBEL, K. T.; WASSEN, M. J. Flood mapping with remote sensing and hydrochemistry: A new method to distinguish the origin of flood water during floods. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 9, p.1334-1349, 2011.

CHOW, V. T.; MAIDMENI, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology.** Berkshire, Uk: McGraw-hill Book Co (uk), p. 572, 1988.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ASFORA, M. C.; TORRES FILHO, C. O. **Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Aspectos Hidrológicos e Ações de Reconstrução.** In: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. Anais [...]. Ipojuca: IWRA, 2011. p. 1- 14.

COSTA, A. J. S. T. **Os Caminhos da exclusão hidrológica no Rio de Janeiro (RJ).** 2010. 210 f. Tese (Doutorado em Ambiente e Sociedade) – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

COSTA, A. J. S. T.; SILVA ROCHA, Í. V. O USO DE GRANDES RESERVATÓRIOS PARA A ARMAZENAGEM DA ÁGUA DA CHUVA NO CONTROLE DE ENCHENTES URBANAS. **Ciência Geográfica - Bauru**, v. XXIII, 2019.

CUNHA, B. A.; RODRIGUES, N. Planejamento Urbano Eficiente: Redução de Emissões, Mobilidade e Co-Benefícios da Aglomeração Urbana. **Ensaio Energético**, 2024.

CUNHA, Zandra Almeida et al. Aplicabilidade do método número da curva (CN/SCS) com base em valores de CN tabelados: estudo de caso na bacia hidrográfica do Arroio Cadeia. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis-SC, novembro**, p. 1-8, 2017.

FILHO, G. M. M.; ANDRADE, R. S.; JUNIOR, J. C. Z.; FILHO, L. N. L. M. MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47, 2012.

FONSECA NETO, G. C. **Vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho Cavouco em Recife em resposta às mudanças climáticas e à abertura das comportas da barragem de Carpina**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br> Acesso em: 22 ago. 2024.

FRANK, B.; PINHEIRO, A. (Org.). **Enchentes na bacia do Itajaí: 20 anos de experiências**. 1. ed. Blumenau: Editora da FURB, 237 p, 2003.

FRIESECKE, F. Precautionary and sustainable flood protection in Germany—Strategies and instruments of spatial planning. In: **3rd FIG Regional Conference, Jakarta, Indonesia**, p. 3-4, 2004.

G1. Barragem transborda por causa das chuvas, ponte fica submersa e moradores atravessam de barco. Disponível em: <https://g1.globo.com/>. Acesso em: 10 de nov, 2024.

GENOVEZ, A. M. **Vazões máximas**. In: PAIVA. J. B. D.; PAIVA. E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (2011:Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 17p., 2011.

GÓES, V. C. **Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica Integrada ao Geoprocessamento para Avaliação da Macrodrenagem em Centros Urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

GOMES, M. M. A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na bacia do rio Capibaribe**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: Acesso em: 06 set. 2024.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ARCANGELETTI, E.; NARDI, F. Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic hydraulic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 487, p.39-47, 2013.

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

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 ago. 2024.

JANSEN, R. B. **Dams and public safety**. Denver (USA), US Department of the Interior, Water and Power Resources Service, 1980.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KIRPICH, Z. P. **Time of concentration of small agricultural watersheds**. J. of Civ. Eng., v. 10, n. 6, p. 362, 1940.

KOBIYAMA, L. R. M. M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2013.

KOBIYAMA, Masato et al. **Mapeamento de áreas de risco para prevenção de desastres hidrológicos com ênfase em modelagem hidrogeomorfológica**. Porto Alegre: UFRGS/IPH/GPDEN, 2014. Disponível em: <https://www.ufrgs.br>. Acesso em: 07 set. 2024.

KOBIYAMA, Masato et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006.

KOBIYAMA, Masato; REGINATTO, Gisele Marilha Pereira; MICHEL, Gean Paulo. Contribuição da engenharia de sedimentos ao planejamento territorial com ênfase em redução de desastres hidrológicos. **Anais do IX Encontro nacional de Engenharia de Sedimentos**, 2010.

LAMBERT, M. P. **Estudo dos indicadores de risco de inundação no município do Recife decorrente do rompimento hipotético da barragem de Carpina**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br>. Acesso em: 19 mar. 2024.

LINS, Renato Cavalcanti. **Modelagem hidráulica do canal Beira Rio nos cenários de requalificação do curso d'água e de implantação de bacia de retenção**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MACEDO, R. L. **Estudo Hidrológico da Bacia do Rio Negrinho–SC Utilizando o HEC-HMS**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MAGALHAES, João Victor Regis. **Comportamento hidrológico e hidrodinâmico no canal do Frágoso em Olinda, nordeste do Brasil, para diversos cenários de enchente**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

MAMÉDIO, F. M. P.; CASTRO, N. M. R.; CORSEIUL, C. W. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. **REGA**, v. 15, 2018.

MARCIANO, Alexandre Germano; BARBOSA, Alexandre Augusto; SILVA, Ana Paula Moni. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 1, p. e1906, 2018.

MARENCO, J.; MULLER-KARGER, F.; PELLING, M.; REYNOLDS, C. J.; MERRILL, S. B.; NUNES, L. H.; PATERSON, S., GRAY, A. J. LOCKMAN, J. T., KARTEZ, J., MOREIRA, F. A., GRECO, R., HARARI, J., SOUZA, C. R. G., ALVES, L. M., HOSOKAWA, E. K.; TABUCHI, E. K. An Integrated Framework to Analyze Local Decision Making and Adaptation to Sea Level Rise in Coastal Regions in Selsey (UK), Broward County (USA), and Santos (Brazil). **American Journal of Climate Change**, v. 6, p. 403-424, 2017.

MARTINS, M. H.; MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F. S. Mapeamento de Superfícies Impermeáveis utilizando ortofotos, imagens de satélite e regressão linear. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 91-101, 2018.

MATOS, J. M. M. **Modelos probabilísticos para chuvas intensas na bacia do Rio Capibaribe – PE**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/41757>. Acesso em: 15 ago. 2024.

MATOS, Juliana Maria Martins. **Modelos probabilísticos para chuvas intensas na bacia do Rio Capibaribe–PE**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MATTEDI, M. A.; BUTZKE, I. C. A relação entre o natural e o social nas abordagens de hazards e de desastres. **Ambiente & Sociedade**, n. 9, p. 93-114, 2001.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

MILDE, L. C. E.; MORAES, J.M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, F.F.B.; GROppo, J. Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 10, n. 19, p. 61-69, 2002.

MISHRA, S. K.; KUMAR, S. R.; SINGH, V. P. Calibration and validation of a general infiltration model. *Hydrological Processes*, v. 13, p. 1691–1718, 1999.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D.L.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.1, p. 200 - 208, 2016.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHAES, L. O.; UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p.152-167, 2016.

MONTEIRO, Leonardo Romero; KOBİYAMA, Masato. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **Revista REGA-Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2013.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, p. 81, 2005.

MOTTA, B. G.; MATOS, A. J. S.; GERMANO, A. O. **ELABORAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO DE NOVA ERA - MG. 2023**. Disponível em: www.cprm.sgb.gov.br/. Acesso em: 13 de out, 2024.

MOTTA, João Vitor da Silva. **Calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia do córrego Vilarinho, Belo Horizonte/MG. 2024** - 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Urbana) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

NILSSON, C.; REIDY, C. A.; DYNESIUS, M.; REVENGA, C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, v. 308, p. 405-408, 2005.

OLIVEIRA, B. R. G. **Alterações antrópicas em cursos d'água em ambiente urbano: um estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Canal do Manguê – Rio de Janeiro (RJ)**. Monografia (Especialização em Análise Ambiental e Gestão do Território) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D, L.; GUASSELLI, L. A. ESPACIALIZAÇÃO E ANÁLISE DAS INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ/RS. *Geociências*, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.

PADILHA, V. L. **Modelagem hidrológica orientada por eventos de inundação em Lages/SC**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G. **Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. Anais [...]. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br>. Acesso em 21 set. 2024.

PEDRAZZI, J. A. Precipitação. 1999. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/>. Acesso em 04 ago. 2024.

PEREIRA, CARLOS EUGENIO ET AL. **DEFINIÇÃO DA CHUVA DE PROJETO POR MÉTODOS TRADICIONAIS PARA A CIDADE DE UBERLÂNDIA-MG. 2013**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais [...]. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br>. Acesso em 22 set. 2024.

PEREIRA, S. L. G.; **INUNDAÇÕES NA ÁREA URBANA DE TOCANTINS – MG. 2018**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Faculdade Presidente Antônio Carlos De Ubá, Ubá, 2018. Disponível em: <https://ri.unipac.br/repositorio>. Acesso em: 01 nov. 2024.

PERNAMBUCO (2016). Programa Pernambuco Tridimensional. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/> Acesso em: 20 de ago. de 2024.

PERNAMBUCO. Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. SECTMA. Coord. Silva, S.R. Recife, 2006, 104p.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos SRHE. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Capibaribe**. (Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010.

PERNAMBUCO. **Secretaria Executiva de Defesa Civil**. Histórico. Disponível em: <https://www.defesacivil.pe.gov.br>. Acesso em: 24 nov. 2024.

PETERS, J. C. HEC-HMS: hydrologic modeling system: computer software users manual. **Davis: US Army Corps of Engineers**, 1998.

Projeto MapBiomias – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 19 em mai. 2024.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A. GRIEBELER, N. P. Hidros: **Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Editora UFV. Viçosa, 259p, 2006.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M.G.; VERÓL, A.P. Manejo de Águas Urbanas e sua Relação com o Desenvolvimento Urbano em Bases Sustentáveis Integradas — Estudo de Caso dos Rios Pilar-Calombé, em Duque de Caxias/RJ. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume**, v. 18, n. 2, p. 149 - 163, 2013.

RIBEIRO NETO, A. R.; SCOTT, C. A.; LIMA, E. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A. Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p.3449-3459, 2014.

ROCHA, I.V.S. **Enchente urbanas: a implantação de reservatórios de detenção na bacia do Canal do Mangue na cidade do Rio de Janeiro: um estudo de caso**. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ROCHA, Ítalo Vinicius da Silva. **Enchentes Urbanas: a implantação de reservatórios de detenção na bacia do Canal do Mangue na cidade do Rio de Janeiro um estudo de caso**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

RODRIGUES, A. B. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de inundações na Bacia do Fragoso – Olinda/PE**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SALGUEIRO, J. H. P. de B.; PINTO, E. J. de A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. da; SOUZA, W. M. de. Tendência de índices pluviométricos na bacia do rio Capibaribe-PE e sua influência na gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, 2014.

SANTOS, J. B. **MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS, BOTUCATU-SP**. 2017. Tese Doutorado em Agronomia (Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp Campus de Botucatu, 2017.

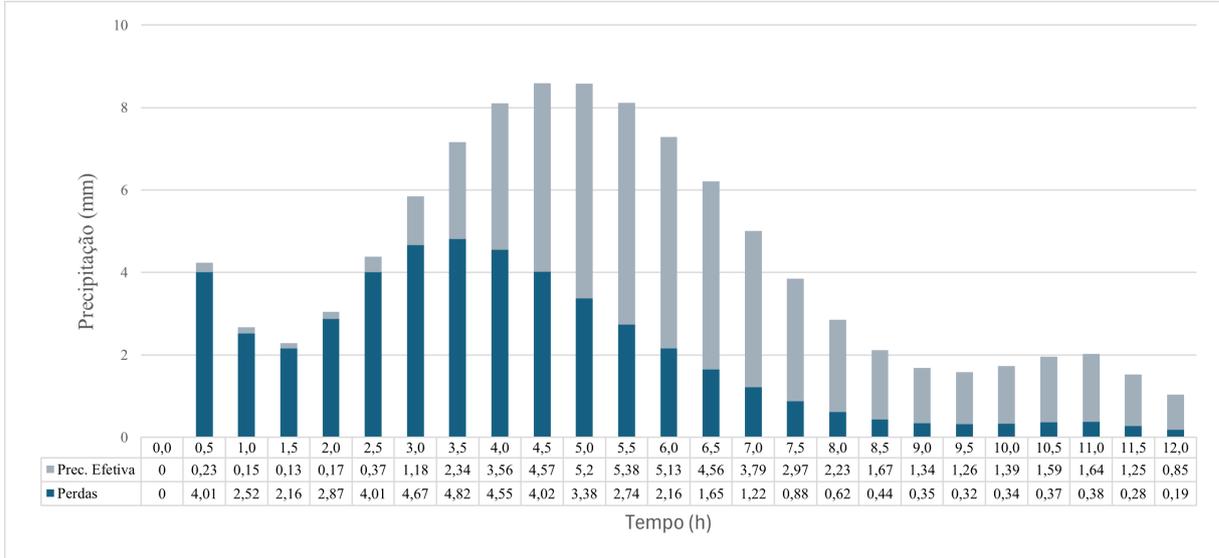
- SANTOS, L. L.I. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **RBGF- Revista Brasileira de Geografia Física**, 9 set. 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- SHIDAWARA, M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v. 1, p. 125-129, 1999.
- SILVA, Claudio Santos; SANTIAGO, Alina. Urbanização e inundação: conflitos e possibilidades. **Paisagem e ambiente**, n. 24, p. 327-334, 2007.
- SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 10, n. 1, 2005.
- SILVEIRA, W. N. **Análise histórica de inundação no município de Joinville – SC, com enfoque na bacia hidrográfica do Rio Cubatão do forte**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação Relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Paraíba**, v. 16, 2005
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, v. 39, n.7, p. 1082-1089, 1911.
- TONET, F. L. **Mapeamento da mancha de inundação da sub-bacia do rio Águas Vermelhas no bairro Vila Nova em Joinville/SC**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 06 set. 2024.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS**. 1., 2004, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. CD-ROM. Florianópolis, 2004.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: **Editora da UFRGs**, p. 678, 2005.
- UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. 2.ed. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.
- USACE. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Version 4.12. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2023.
- USACE. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 157 p., 2000.
- USACE. River Analysis System HEC-RAS: User's Manual. Version 6.5. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2024.
- VERÇOSA, L. F. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br>. Acesso em: 06 set. 2024.

VESTANA, R. V. A importância da Hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais. **Ambiência**, v. 4, p. 151-162, 2008.

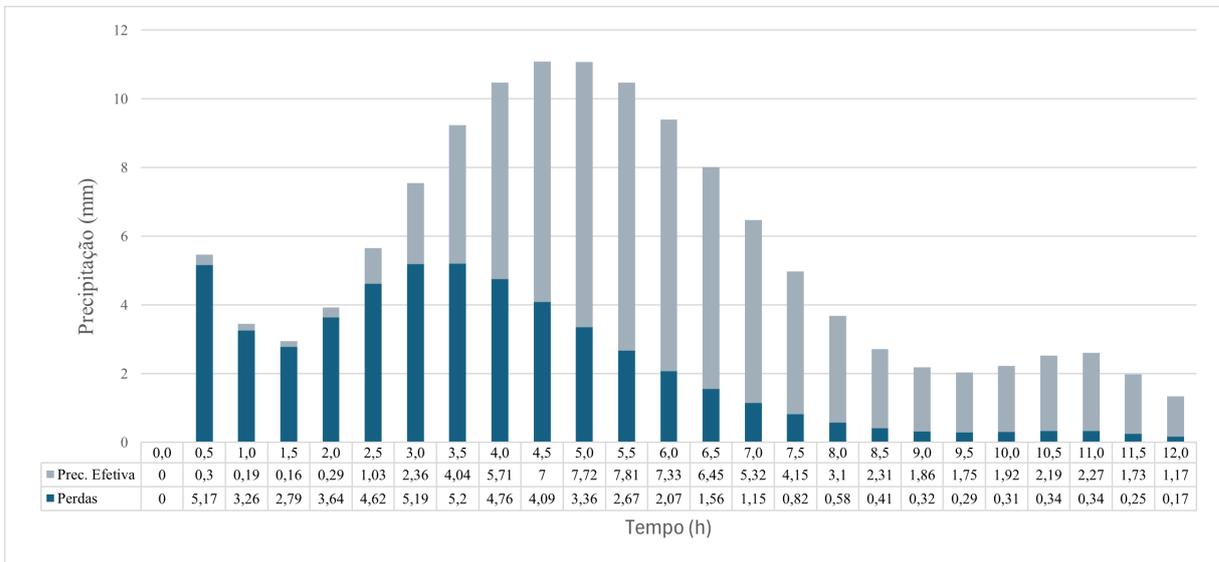
Apêndice A – Gráficos da distribuição temporal das chuvas por sub-bacia e tempo de retorno

Figura A1 – Distribuição da precipitação na sub-bacia 1 para Tr 10 anos



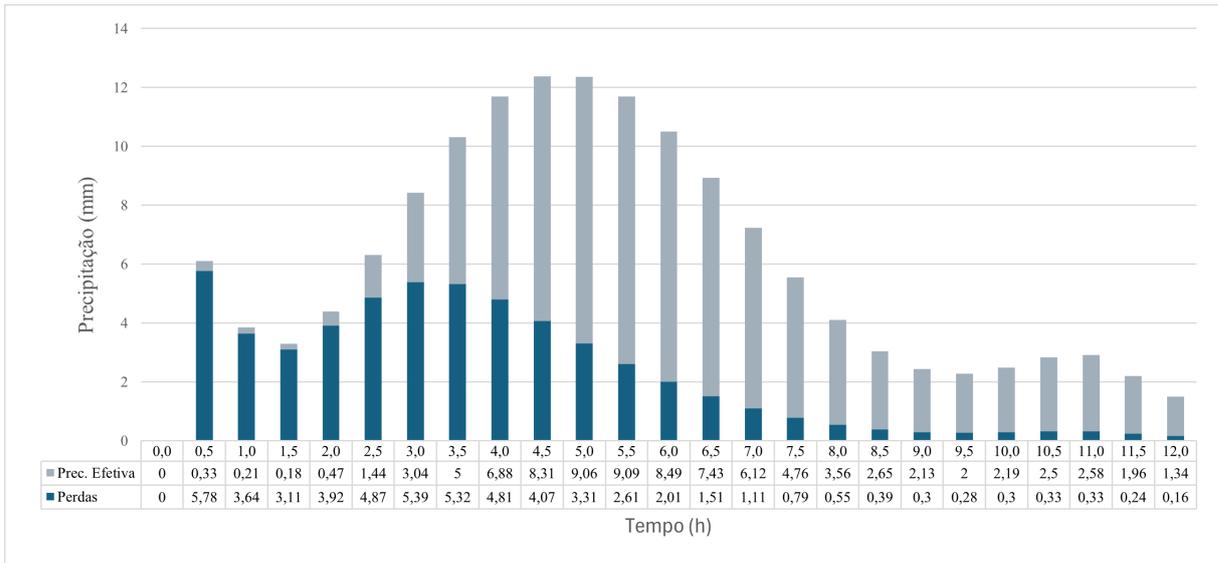
Fonte: A autora (2024).

Figura A2 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 1 para Tr 50 anos



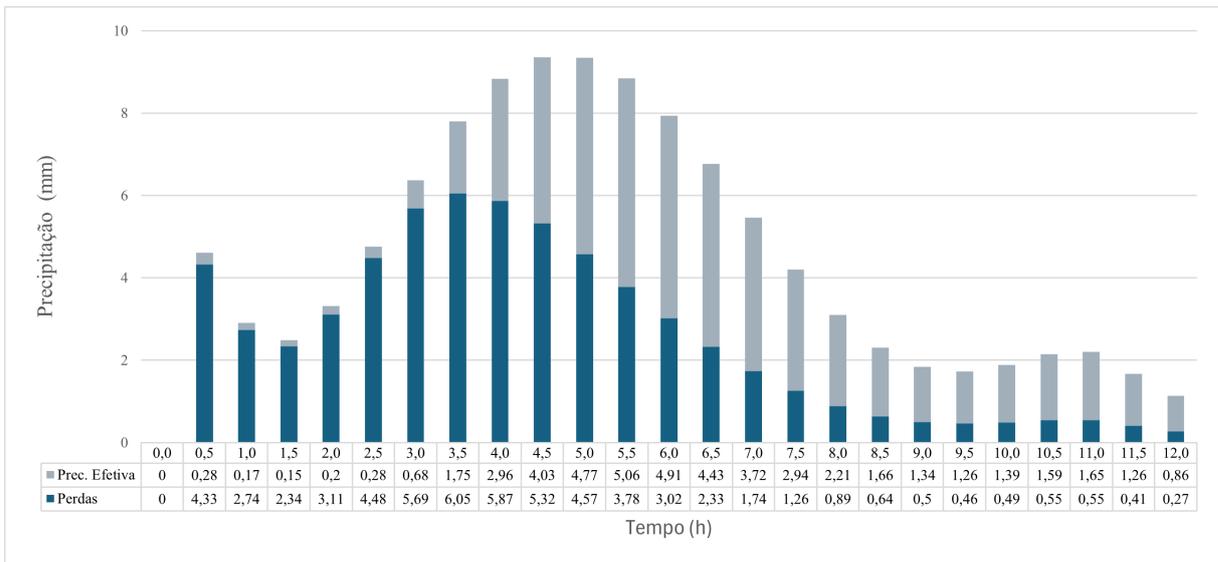
Fonte: A autora (2024).

Figura A3 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 1 para Tr 100 anos



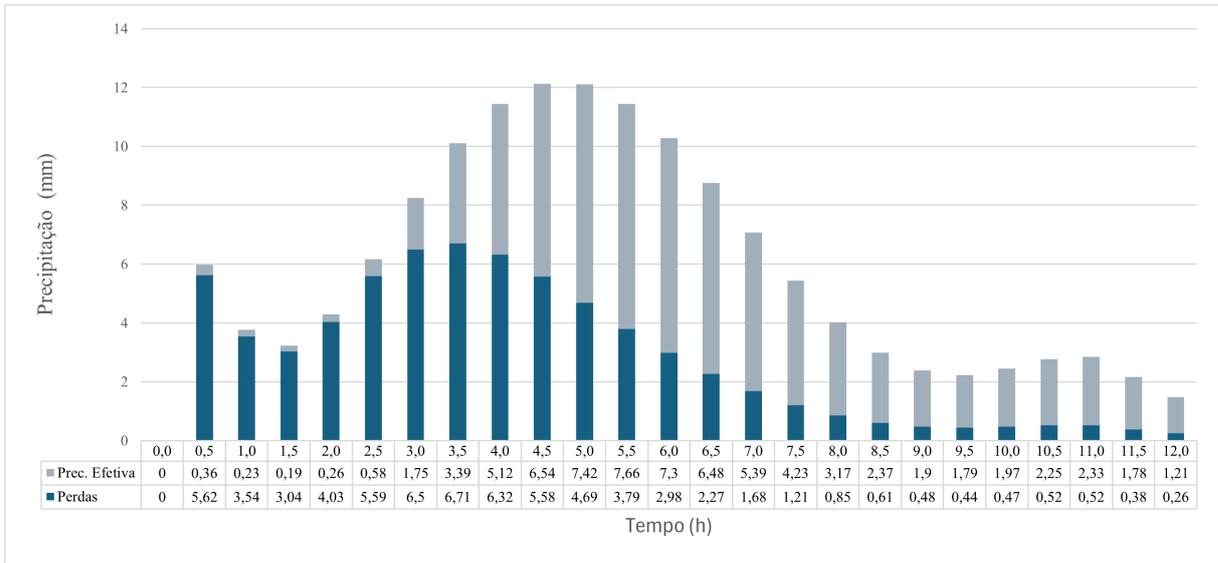
Fonte: A autora (2024).

Figura A4 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 2 para Tr 10 anos



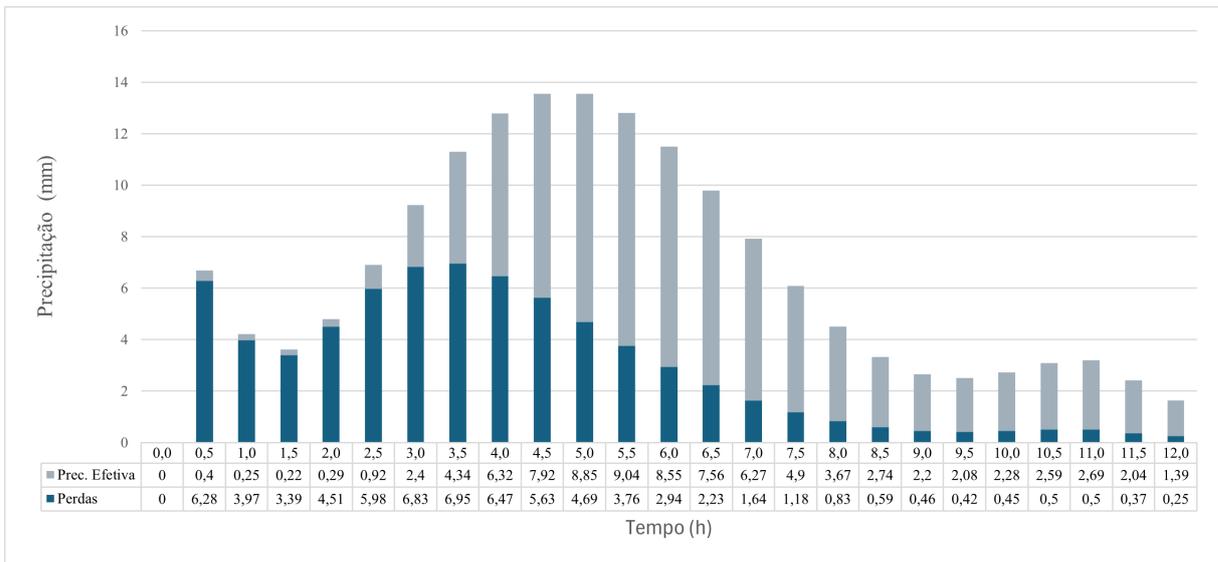
Fonte: A autora (2024).

Figura A5 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 2 para Tr 50 anos



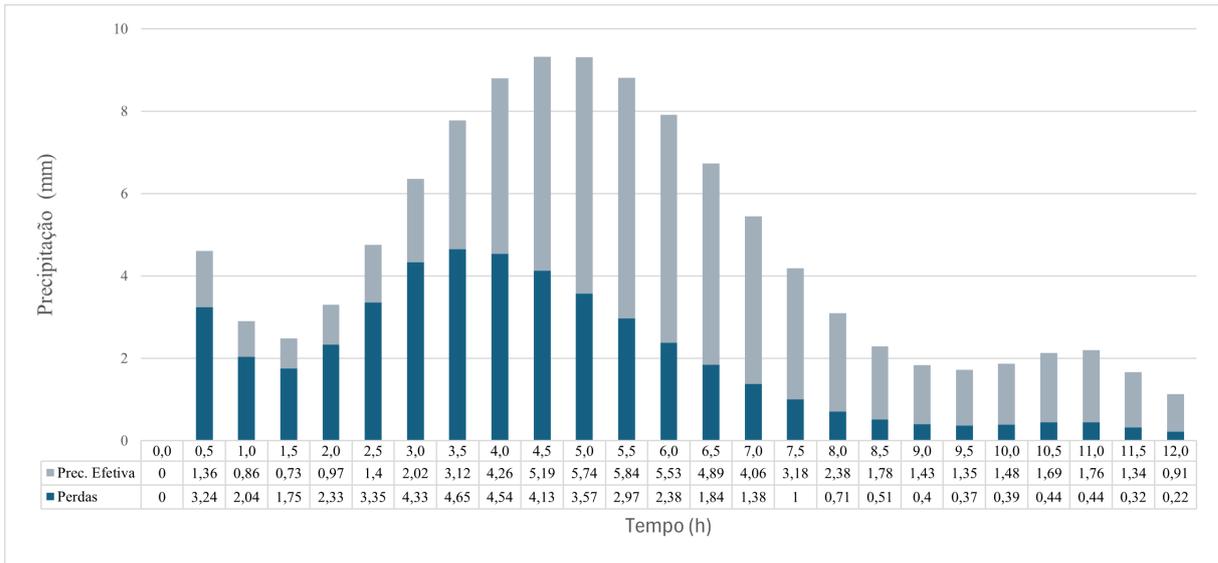
Fonte: A autora (2024).

Figura A6 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 2 para Tr 100 anos



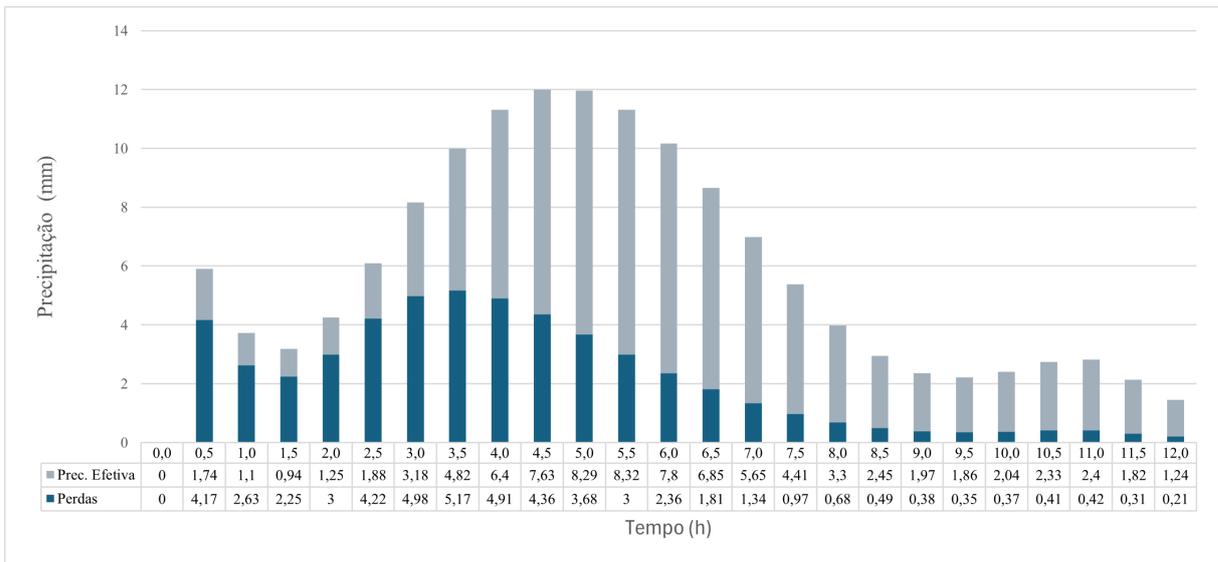
Fonte: A autora (2024).

Figura A7 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 3 para Tr 10 anos



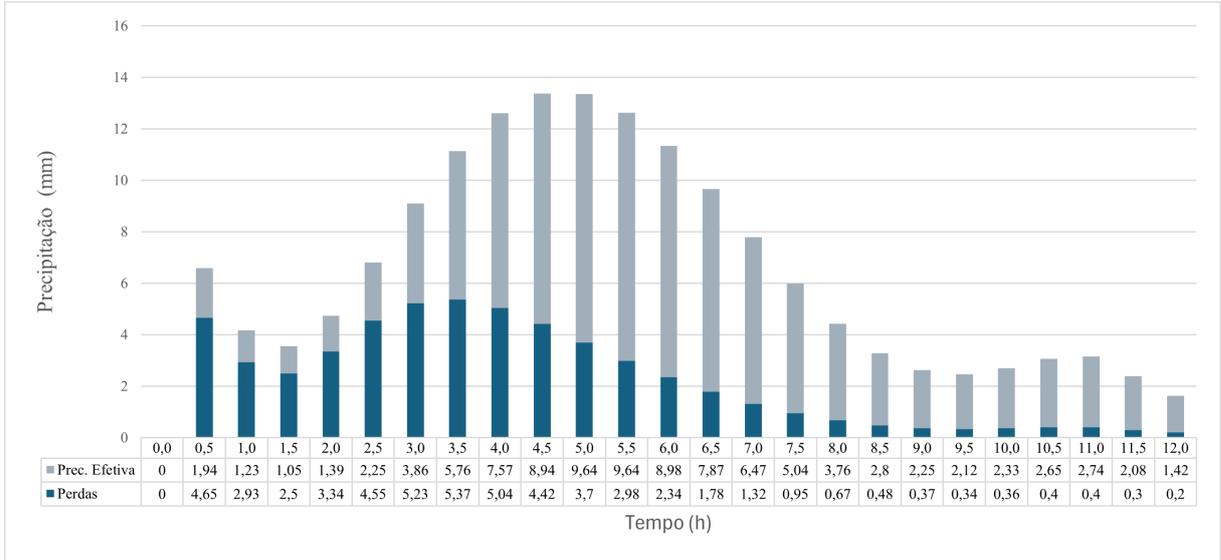
Fonte: A autora (2024).

Figura A8 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 3 para Tr 50 anos



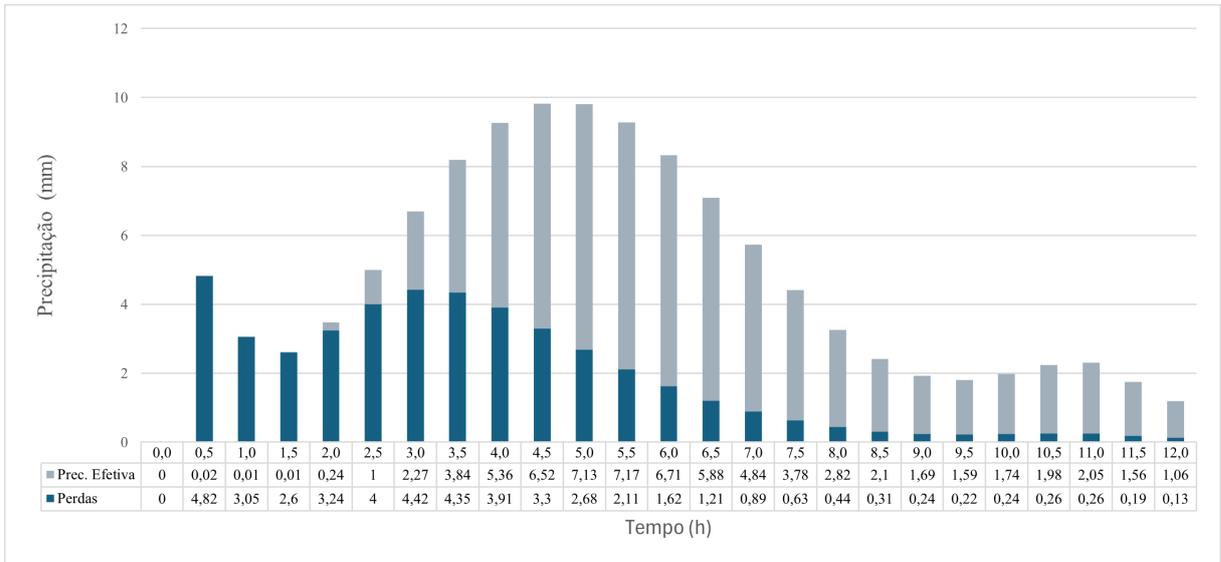
Fonte: A autora (2024).

Figura A9 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 3 para Tr 100 anos



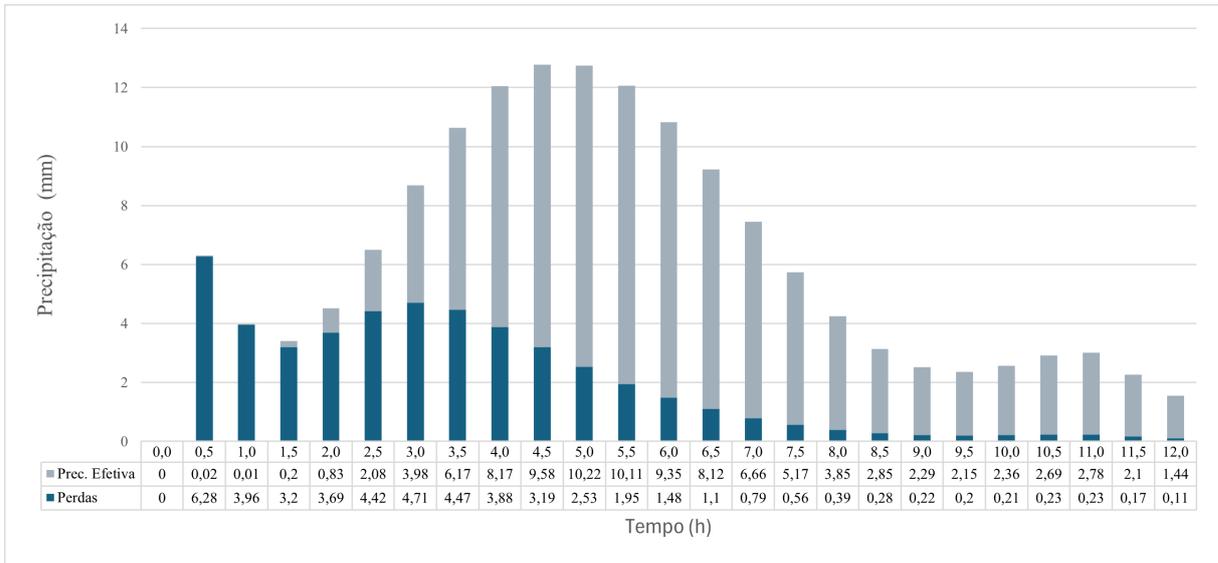
Fonte: A autora (2024).

Figura A10 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 4 para Tr 10 anos



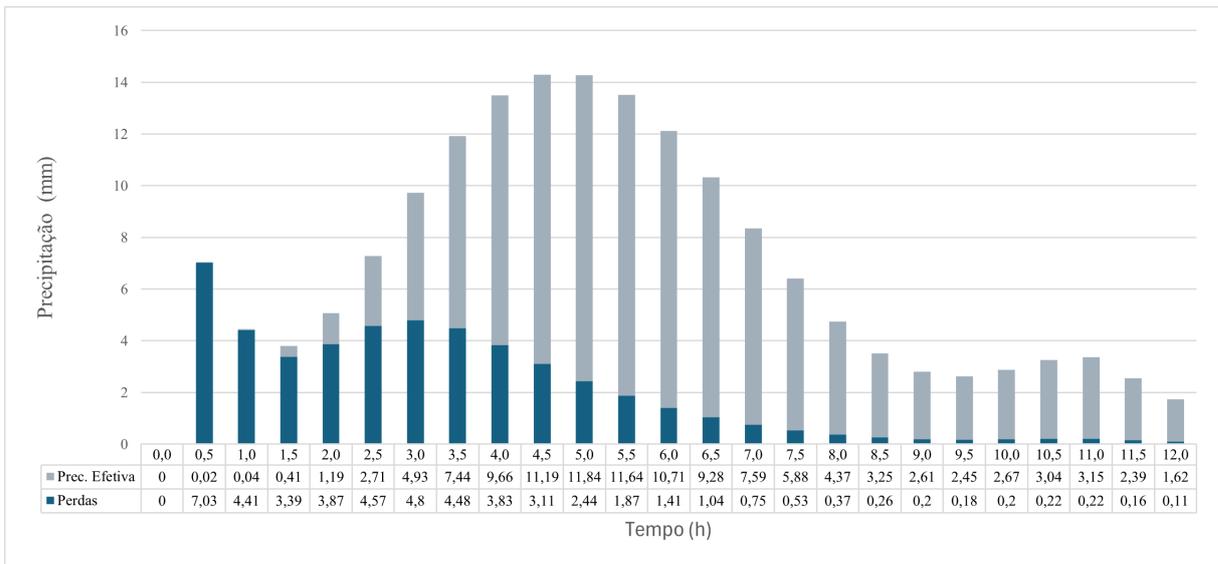
Fonte: A autora (2024).

Figura A11 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 4 para Tr 50 anos



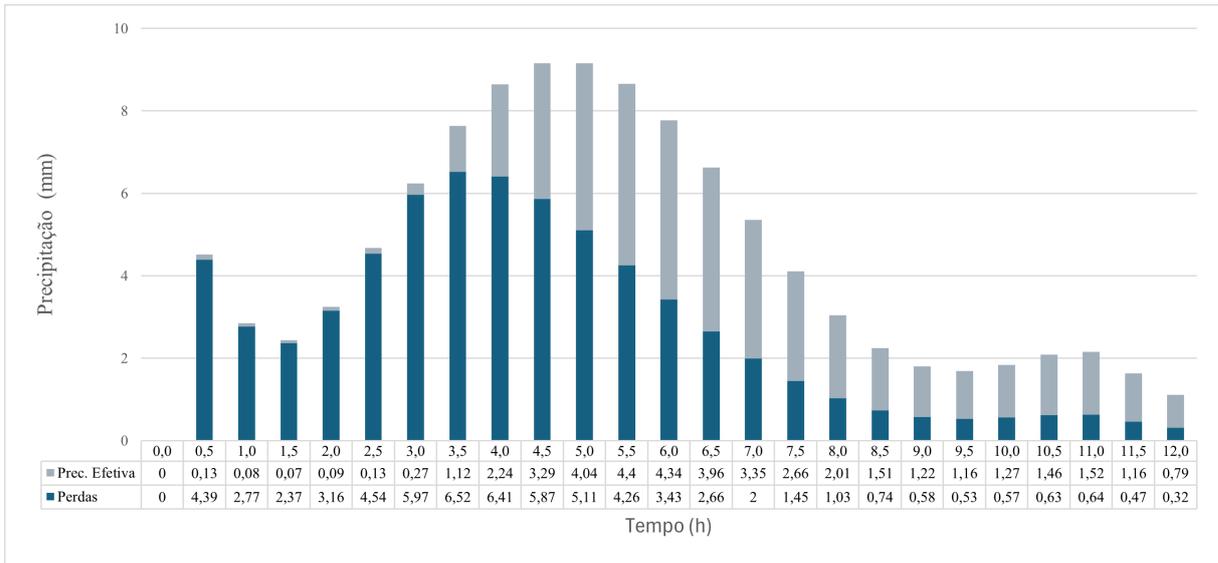
Fonte: A autora (2024).

Figura A12 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 4 para Tr 100 anos



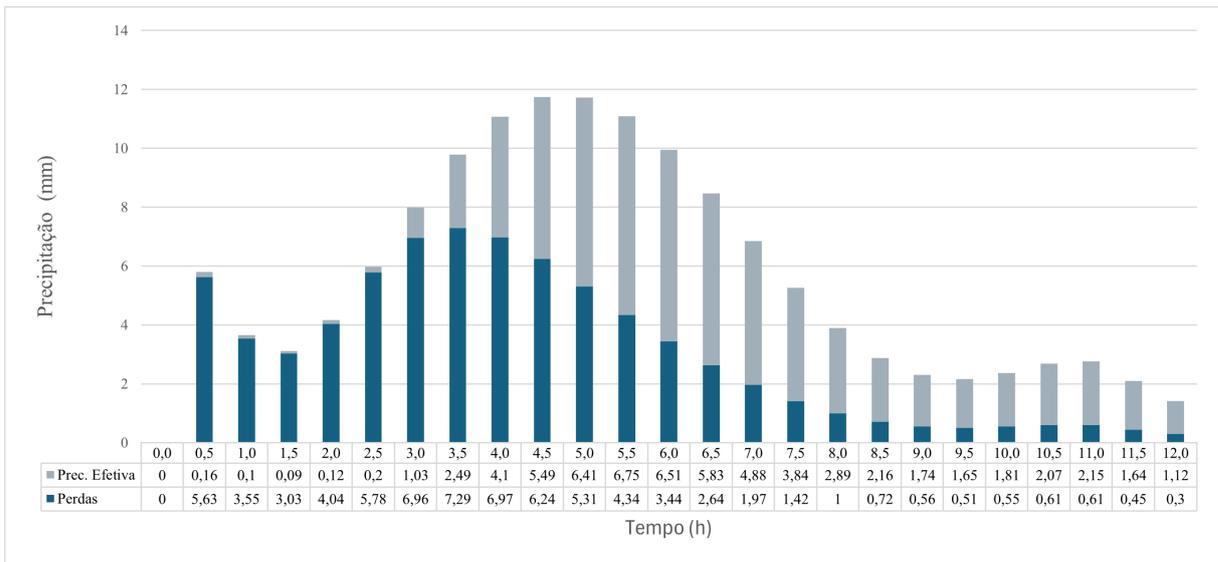
Fonte: A autora (2024).

Figura A13 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 5 para Tr 10 anos



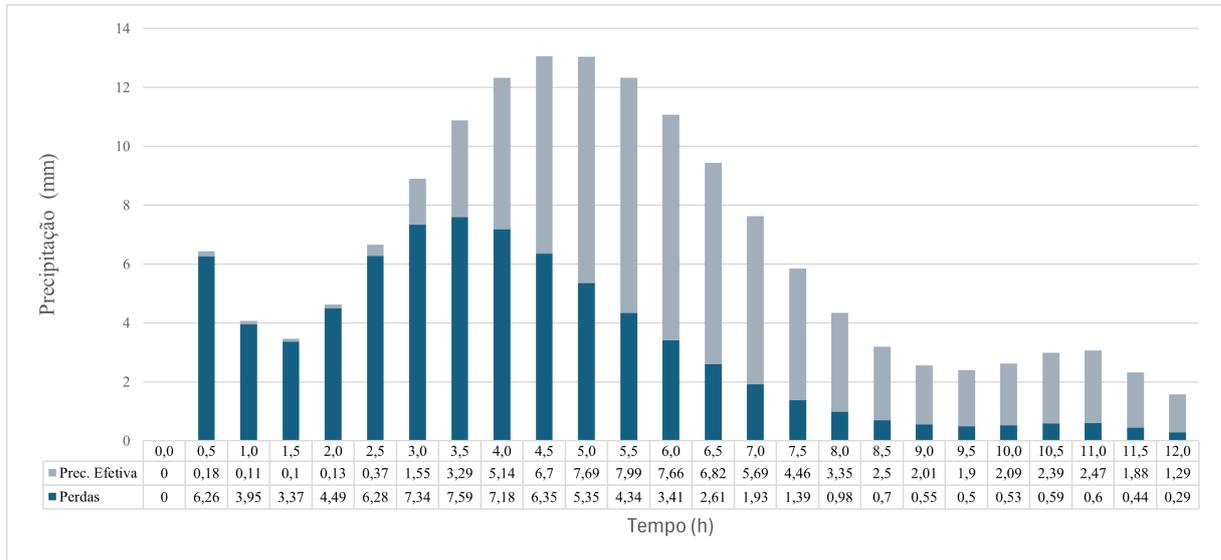
Fonte: A autora (2024).

Figura A14 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 5 para Tr 50 anos



Fonte: A autora (2024).

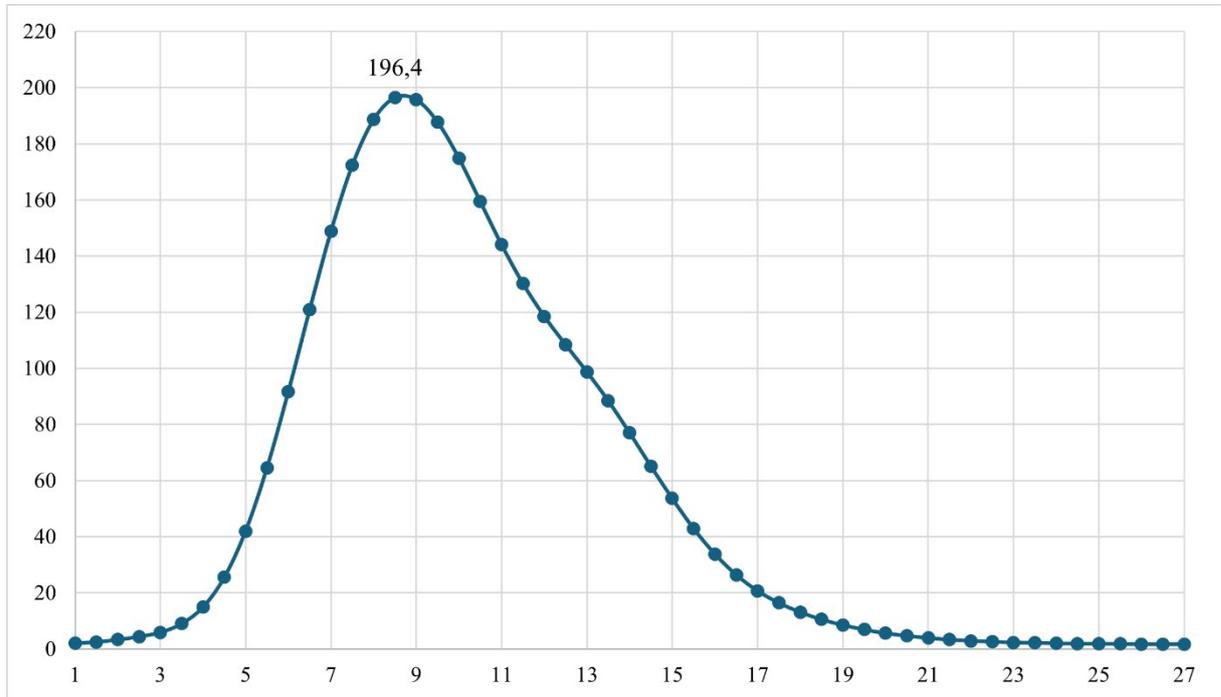
Figura A15 - Distribuição da precipitação na sub-bacia 5 para Tr 100 anos



Fonte: A autora (2024).

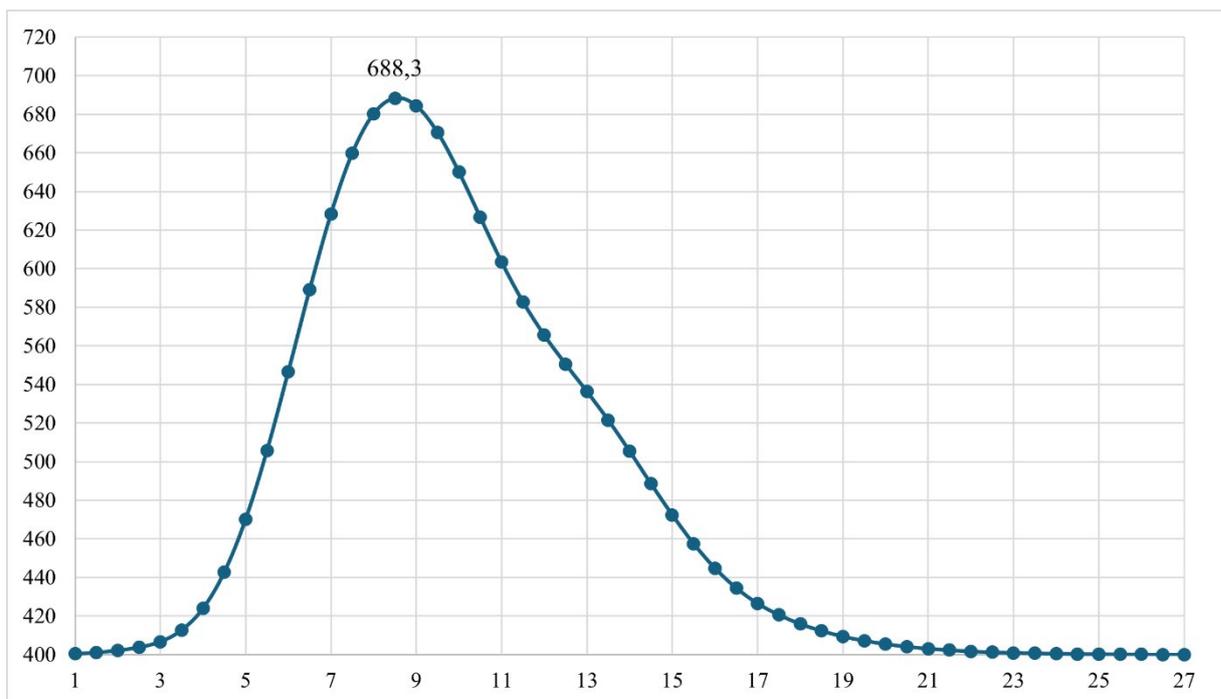
Apêndice B – Gráficos dos Hidrogramas por sub-bacia e cenários

Figura B1 – Hidrograma da sub-bacia 1 para o cenário 1



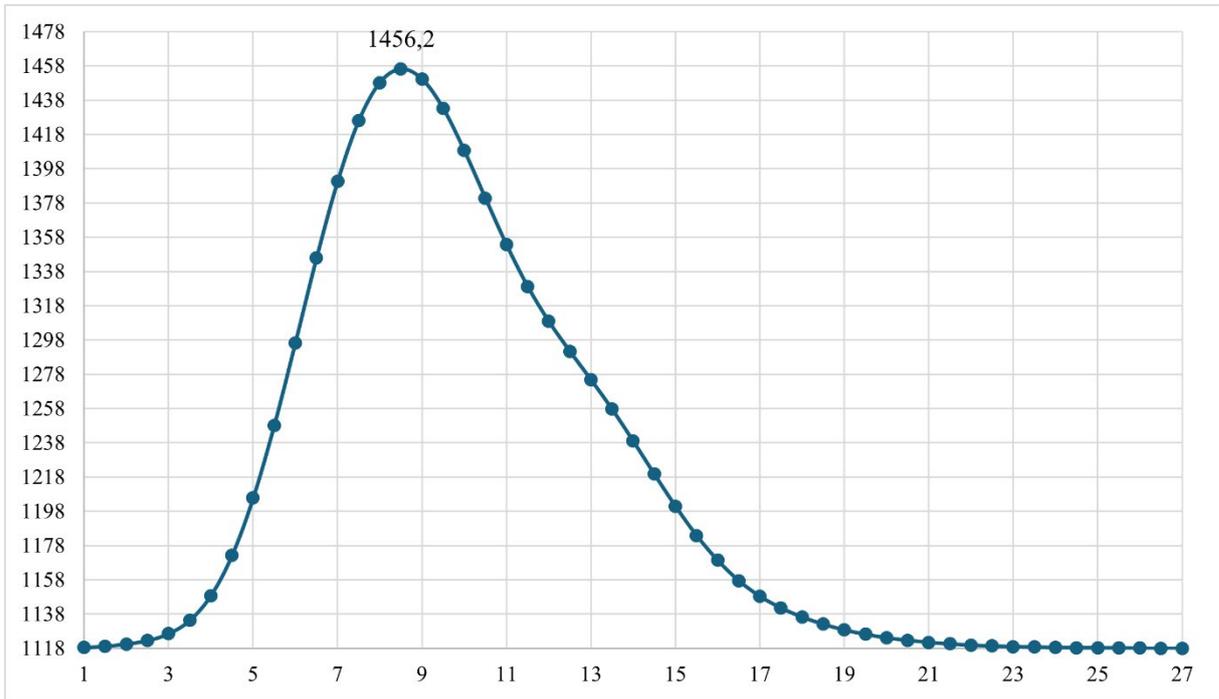
Fonte: A autora (2024).

Figura B2 - Hidrograma da sub-bacia 1 para o cenário 2



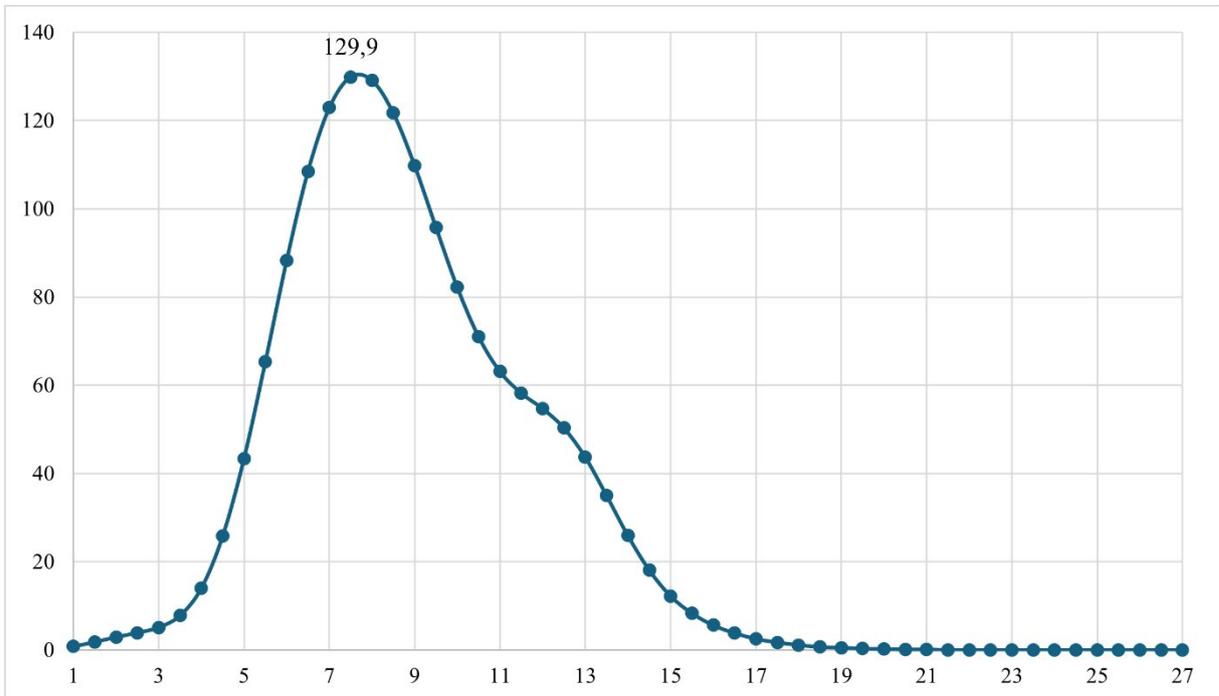
Fonte: A autora (2024).

Figura B3 - Hidrograma da sub-bacia 1 para o cenário 3



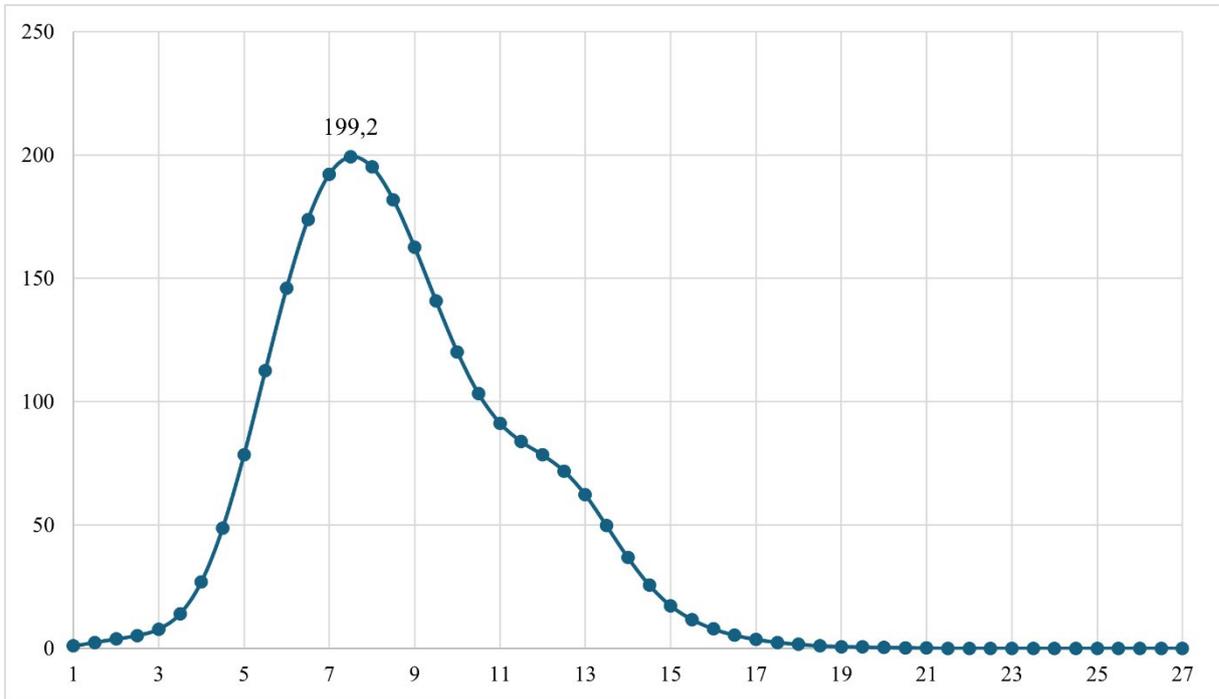
Fonte: A autora (2024).

Figura B4 - Hidrograma da sub-bacia 2 para o cenário 1



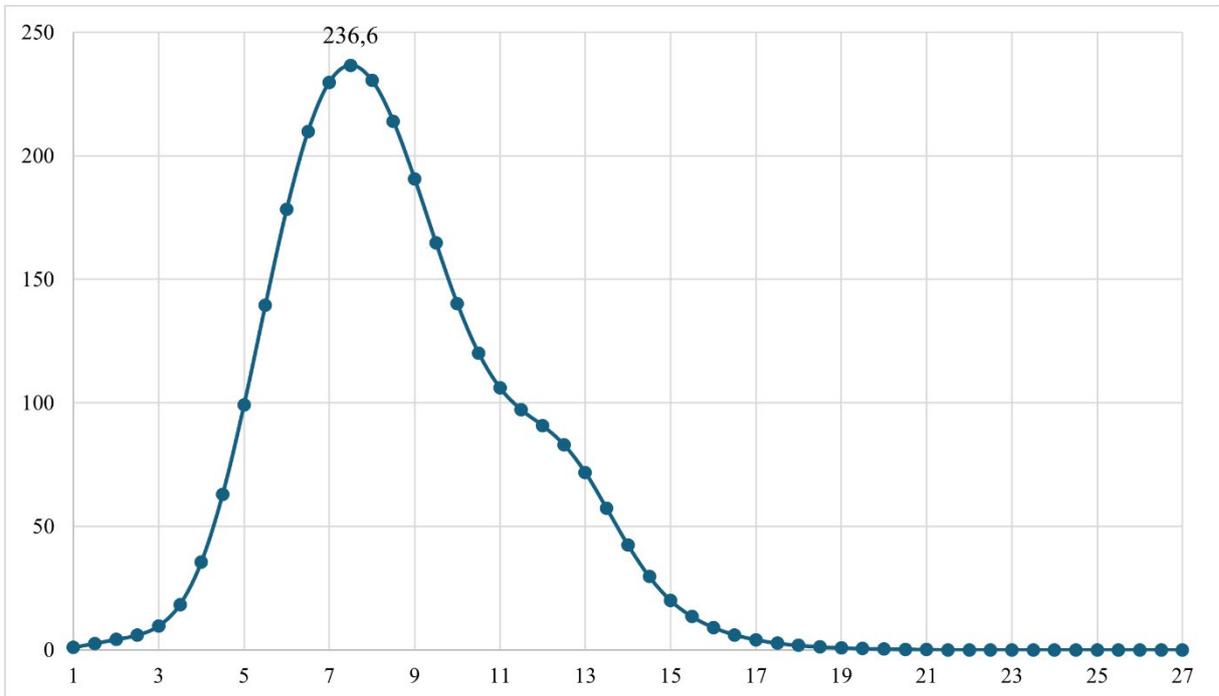
Fonte: A autora (2024).

Figura B5 - Hidrograma da sub-bacia 2 para o cenário 2



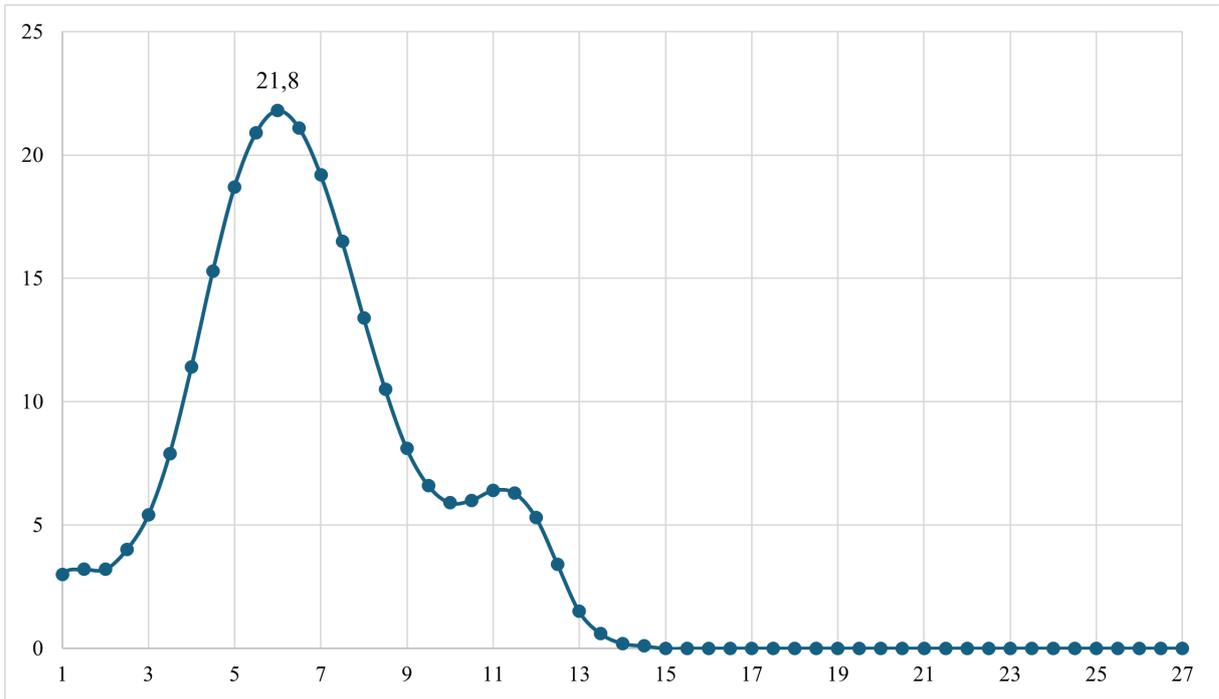
Fonte: A autora (2024).

Figura B6 - Hidrograma da sub-bacia 2 para o cenário 3



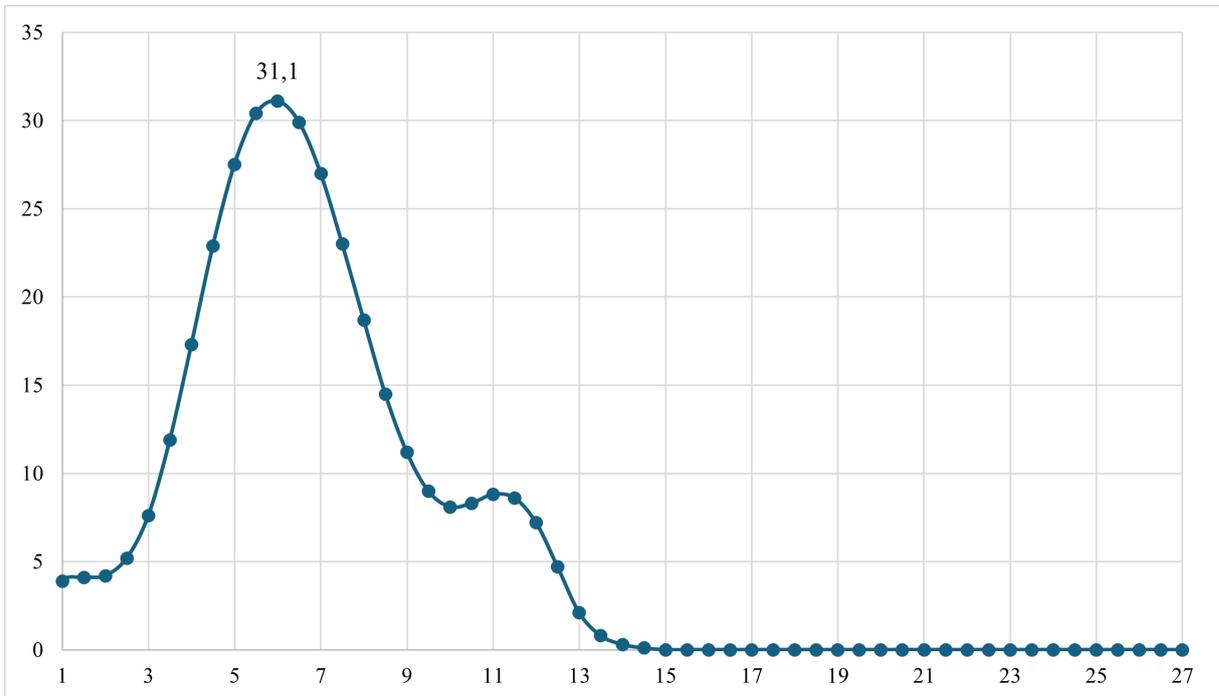
Fonte: A autora (2024).

Figura B7 - Hidrograma da sub-bacia 3 para o cenário 1



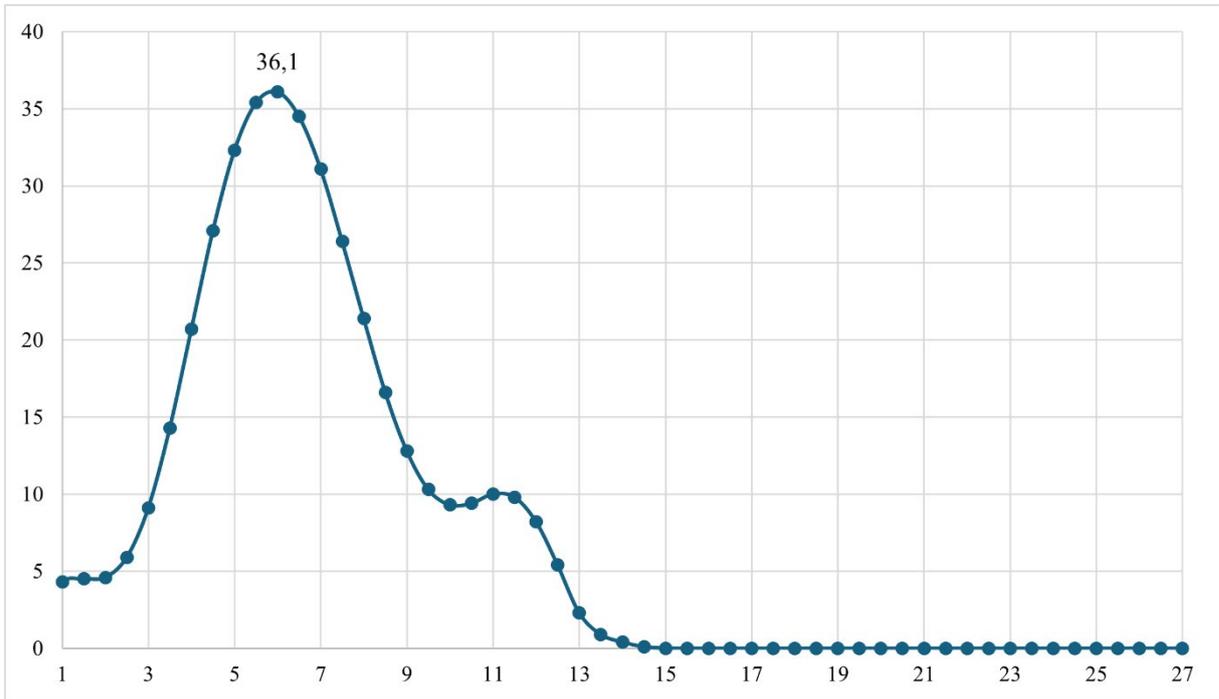
Fonte: A autora (2024).

Figura B8 - Hidrograma da sub-bacia 3 para o cenário 2



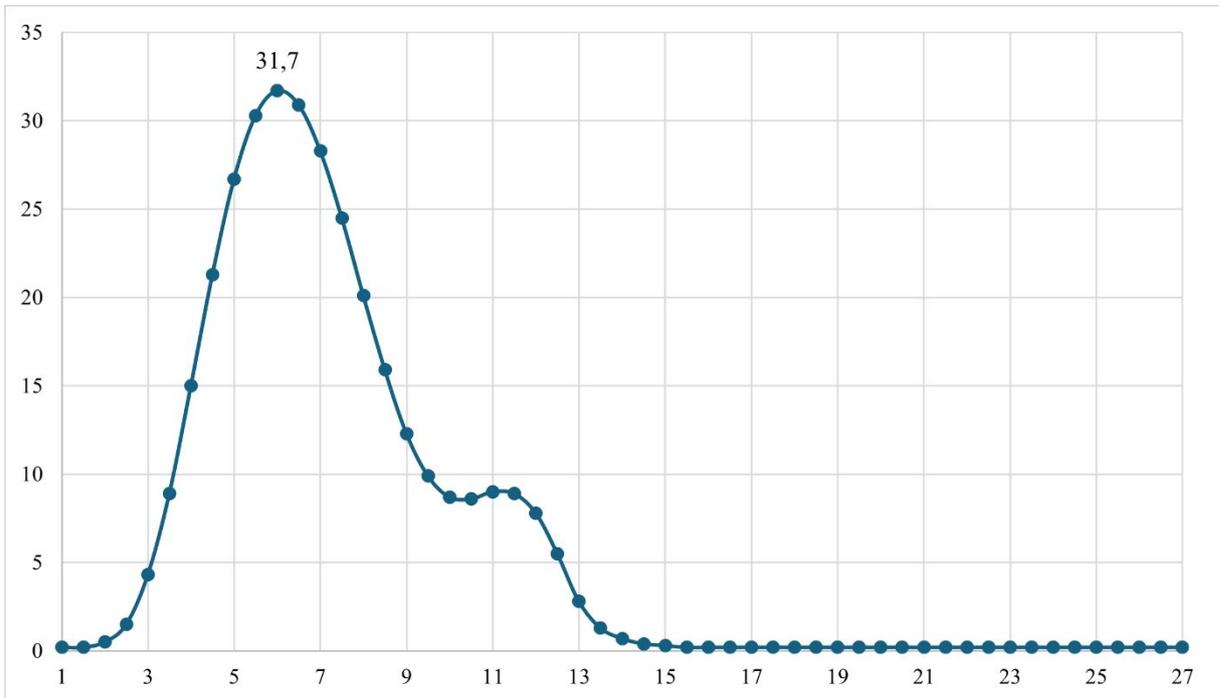
Fonte: A autora (2024).

Figura B9 - Hidrograma da sub-bacia 3 para o cenário 3



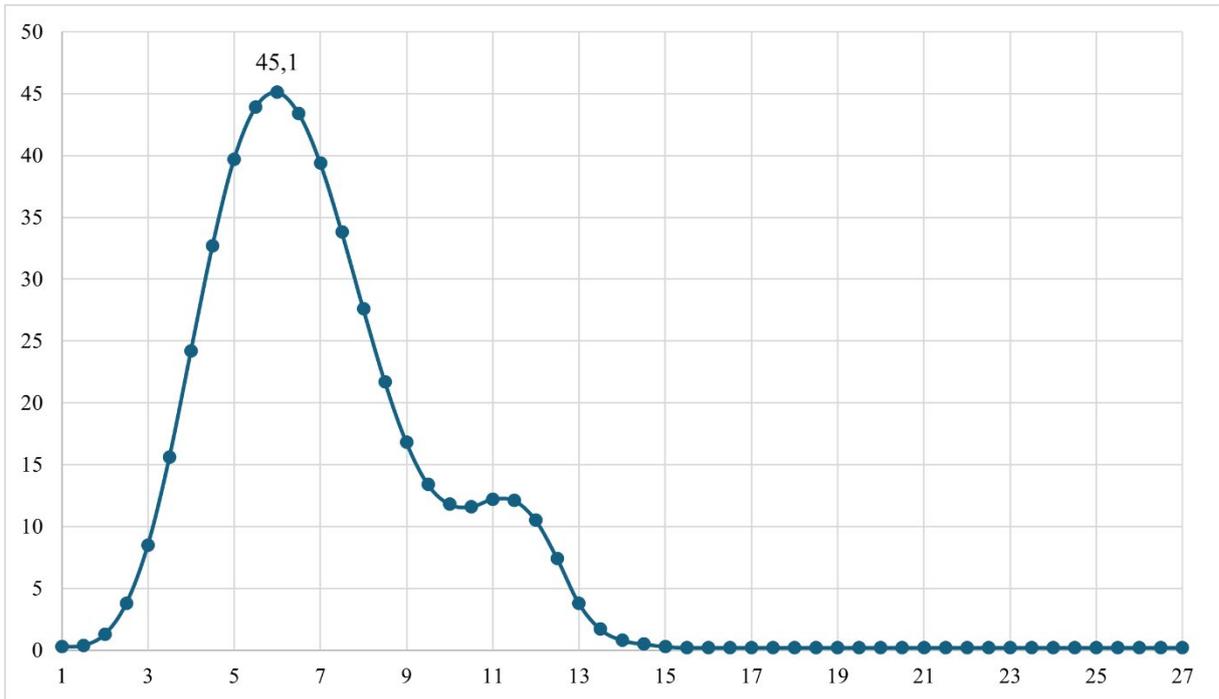
Fonte: A autora (2024).

Figura B10 - Hidrograma da sub-bacia 4 para o cenário 1



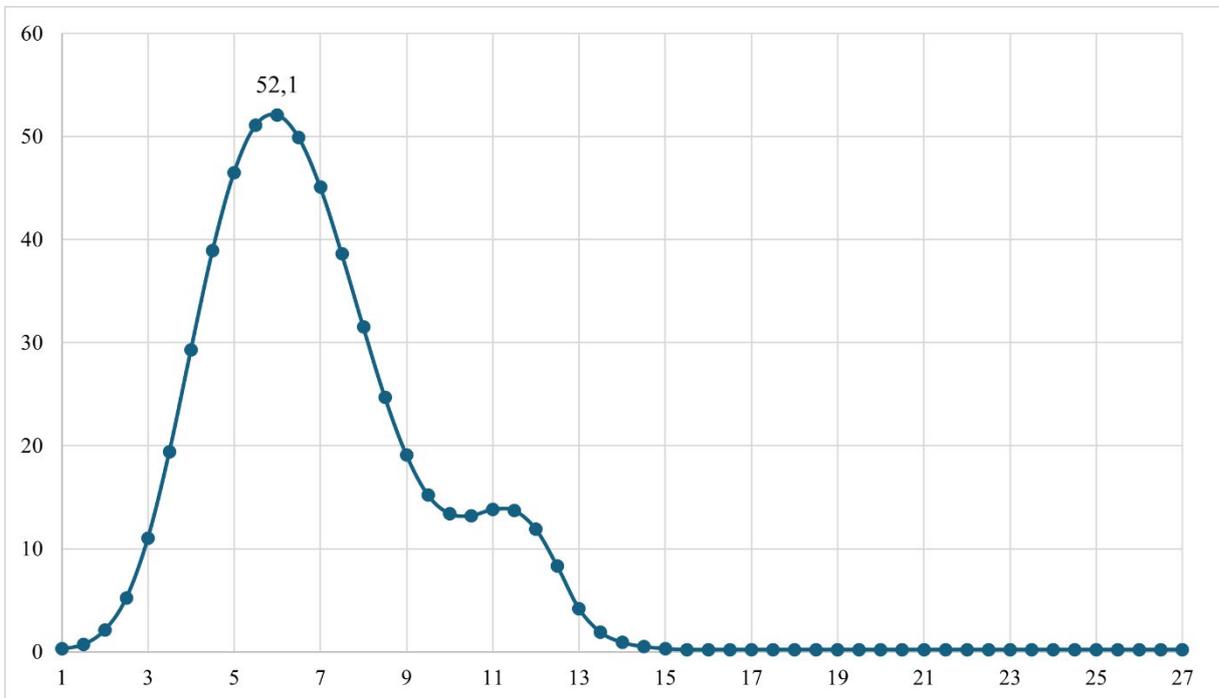
Fonte: A autora (2024).

Figura B11 - Hidrograma da sub-bacia 4 para o cenário 2



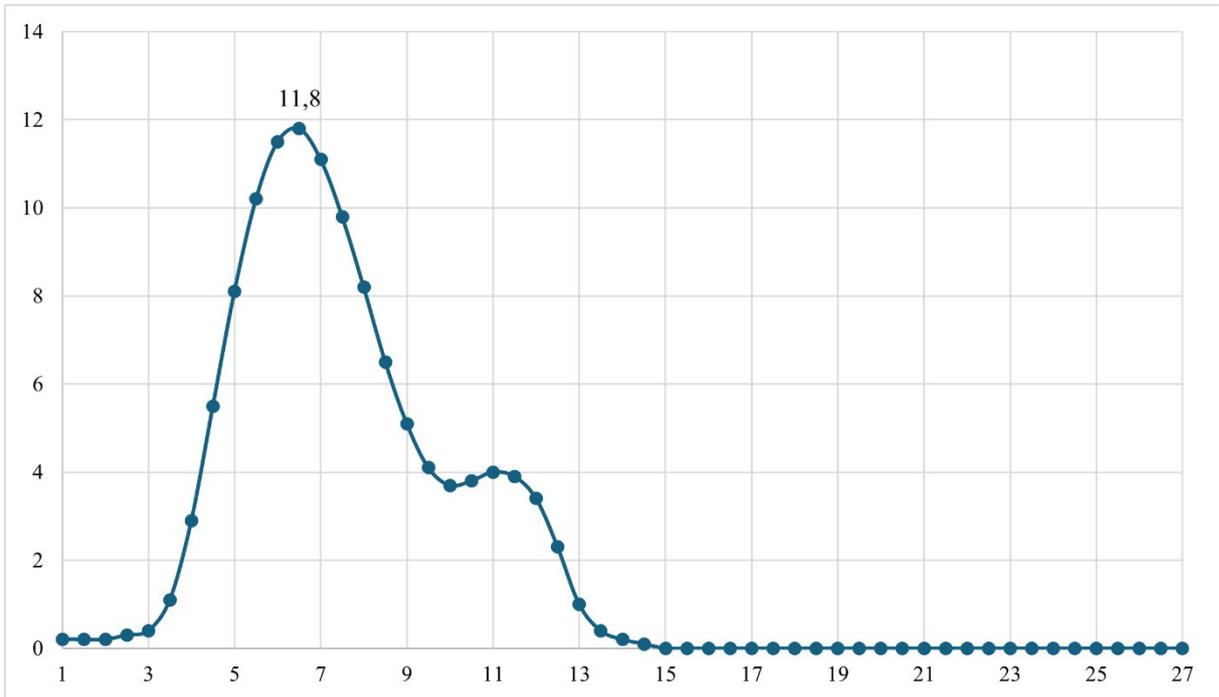
Fonte: A autora (2024).

Figura B12 - Hidrograma da sub-bacia 4 para o cenário 3



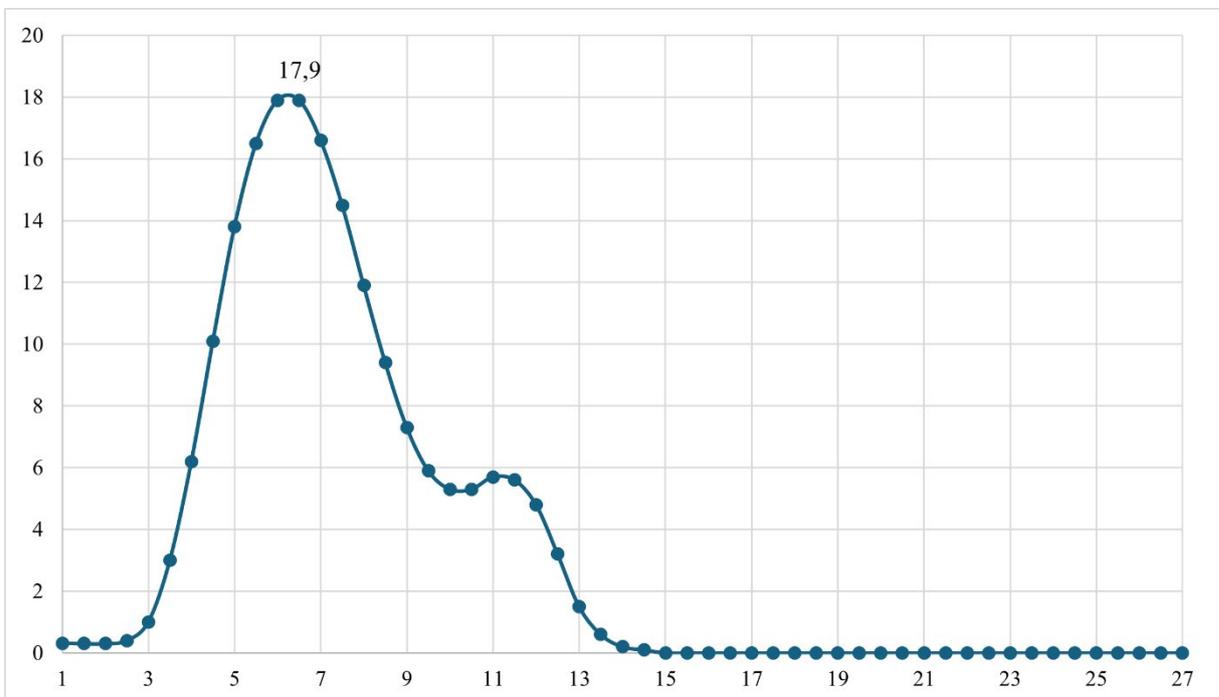
Fonte: A autora (2024).

Figura B13 - Hidrograma da sub-bacia 5 para o cenário 1



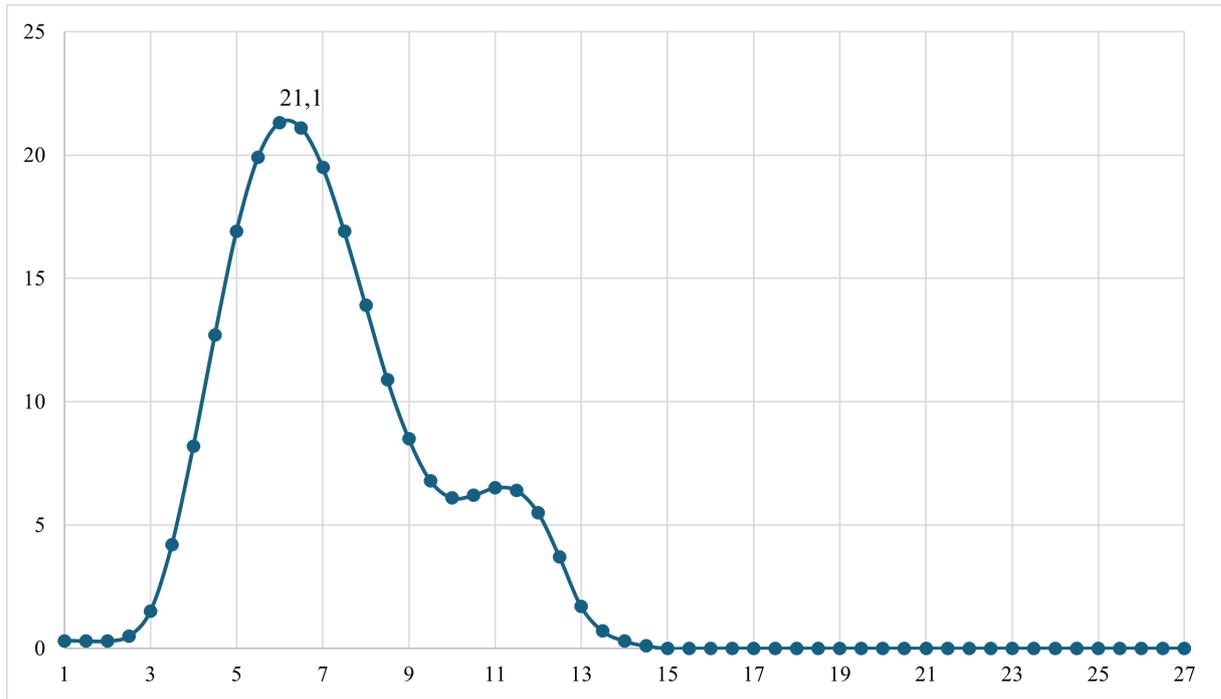
Fonte: A autora (2024).

Figura B14 - Hidrograma da sub-bacia 5 para o cenário 2



Fonte: A autora (2024).

Figura B15 - Hidrograma da sub-bacia 5 para o cenário 3



Fonte: A autora (2024).