



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ACAUÃ BERNARDO DA SILVA PEREIRA

**Modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica do rio Morno, Recife-PE,
para evento de inundação considerando regime de chuvas atuais e mudanças climáticas.**

JOÃO PESSOA - PARAÍBA
2025

ACAUÃ BERNARDO DA SILVA PEREIRA

**Modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica do rio Morno, Recife-PE,
para evento de inundação considerando regime de chuvas atuais e mudanças climáticas.**

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação
em Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba, apresentado como
requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Adriano Rolim da Paz

JOÃO PESSOA- PARAÍBA
2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436m Pereira, Acaua Bernardo da Silva.
Modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia
hidrográfica do rio Morno, Recife-PE, para evento de
inundação considerando regime de chuvas atuais e
mudanças climáticas. / Acaua Bernardo da Silva Pereira.
- João Pessoa, 2025.
67 f. : il.

Orientação: Adriano da Paz.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. HEC-RAS; HEC HMS; Inundações urbanas; Drenagem
urb. I. Paz, Adriano da. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ACAUÃ BERNARDO DA SILVA PEREIRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MORNO, RECIFE-PE, PARA EVENTO DE INUNDAÇÃO CONSIDERANDO REGIME DE CHUVAS ATUAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 05/05/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:


Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia/UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)


Davi de Carvalho Diniz Melo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia/UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)


Karolyne Aquino Alexandre Breckenfeld
Departamento de Estradas de Rodagens da Paraíba/DER-PB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)

Documento assinado digitalmente
 **ALINE FLAVIA NUNES REMIGIO ANTUNES**
Data: 06/05/2025 15:20:04-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

*“Dedico esse trabalho aos morros,
córregos e pontes do Recife, e a bacia do
rio Morno, que me viu nascer e me
nutriu por toda a minha vida”*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe, que desde meus 2 anos me leva a escola e me deu suporte durante toda a minha, contínua, educação. Obrigado por acordar todos os dias às 06:00 para preparar o café. Ao meu pai, meu eterno professor, que me estimulou e me encorajou durante toda minha trajetória acadêmica, obrigado por ter me acalentado todas as vezes que eu chorei e pensei em desistir. A minha parceira, que no finalzinho da minha graduação apareceu para me motivar, para me ensinar, e para me mostrar o que é o amor de verdade, se for preciso eu pego um barco e eu remo por 6 meses pra te ver. A toda família, em especial a minha Tia Jade, que é o alicerce que sustenta todas as reuniões familiares. A minha avó Nely, por todo o amor que tem pelos seus netos, e por todas as batalhas que enfrentou por essa família. Ao meu primo-irmão Eryson, que me acolheu em João Pessoa e foi quem me introduziu a vida adulta, compartilhou reponsabilidades e risadas. Ao meu irmão Matheus, que, quando minhas forças faltaram, me carregou e me estimulou com amor e coragem. Aos meus amigos Samuel e Cristian, pela parceria e por nunca dizerem não quando eu precisava de ajuda. Aos colegas do grupo de Pesquisa, na figura de João Victor, que compartilharam experiencias, e seus tempos para garantir o progresso de nossos trabalhos, obrigado por sempre subestimar os desafios para que eu não enlouquecesse. Ao meu orientador, Professor Adriano, que me fez um aspirante a cientista, que me ensinou quando eu estava sedento por aprender, e que teve paciência quando eu não conseguia mais aprender, tenho a sorte de ter essa pessoa excelente como orientador. Por fim agradeço a Deus, pela benção que é estar cercado dessas pessoas maravilhosas.

RESUMO

As inundações urbanas são fenômenos naturais cuja frequência e severidade têm se intensificado nas últimas décadas, impulsionadas pela urbanização desordenada, impermeabilização do solo e mudanças climáticas. Nesse contexto, o estudo da dinâmica hidrológica e hidrodinâmica torna-se essencial para o planejamento urbano e a gestão do risco de desastres. O presente estudo comparou cenários de inundação na bacia hidrográfica do rio Morno, situada no município de Recife-PE, utilizando modelagem computacional aplicada a eventos extremos de cheia. A modelagem hidrológica foi realizada por meio do HEC-HMS, considerando dois cenários de precipitação: o atual, baseado no Plano Diretor de Drenagem do Recife, e um futuro, que incorpora os efeitos das mudanças climáticas. Em seguida, os hidrogramas gerados foram integrados ao modelo hidrodinâmico 2D, HEC-RAS, utilizando um MDT de alta resolução para estimar a propagação da onda de cheia e delimitar as manchas de inundação. Os resultados evidenciaram que as sub-bacias mais urbanizadas apresentaram maiores volumes de chuva excedente e picos de vazão mais elevados, enquanto áreas vegetadas demonstraram maior capacidade de retenção hídrica. Observou-se, ainda, um aumento expressivo da área inundada e da profundidade média da lâmina d'água no cenário de mudanças climáticas, com incremento de zonas classificadas como de risco hidrodinâmico extremo. A análise reforça a necessidade de revisão das estratégias de drenagem urbana e de adaptação das políticas públicas frente à intensificação dos eventos extremos previstos para o futuro.

Palavras-chave:

HEC-RAS; HEC HMS; Inundações urbanas; Drenagem urbana

ABSTRACT

Urban floods are natural phenomena whose frequency and severity have intensified over the past decades, driven by unplanned urbanization, soil impermeabilization, and climate change. In this context, the study of hydrological and hydrodynamic dynamics becomes essential for urban planning and disaster risk management. This study analyzed the flood vulnerability of the Morno River basin, located in the municipality of Recife, Brazil, using computational modeling applied to extreme flood events. Hydrological modeling was carried out using HEC-HMS, considering two precipitation scenarios: the current one, based on the Recife Drainage Master Plan, and a future one, incorporating the effects of climate change. Subsequently, the hydrographs generated were integrated into a 2D hydrodynamic model using HEC-RAS, with a high-resolution digital terrain model (DTM) to simulate flood wave propagation and delineate flood extents. The results showed that the most urbanized sub-basins presented higher volumes of excess rainfall and peak discharges, while vegetated areas demonstrated a greater capacity for water retention. Additionally, a significant increase in both the flooded area and the average flood depth was observed under the climate change scenario, with a marked growth in zones classified as extreme hydrodynamic risk. The analysis reinforces the need to revise urban drainage strategies and adapt public policies in response to the intensification of extreme events expected in the future.

Keywords:

HEC-RAS; HEC HMS; Urban floods; Urban drainage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma das etapas metodológicas.	20
Figura 2- Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Morno	21
Figura 3- Situação atual do rio Morno- a) Presença de resíduos sólidos no leito do rio; b) ocupações irregulares nas margens do rio	25
Figura 4- Representação esquemática do impacto da degradação da resolução espacial de um píxel.	26
Figura 5- Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Morno.	26
Figura 6- Perfil longitudinal do rio principal.	27
Figura 7- Precipitação de projeto para o regime de chuvas atual. a) Hietograma de projeto; b) Precipitação acumulada de projeto	29
Figura 8- Precipitação de projeto levando em consideração as mudanças climáticas. a) Hietograma de projeto; b) Precipitação acumulada de projeto.....	29
Figura 9- Discretização da bacia hidrográfica adotada para o modelo hidrológico HEC-HMS.	31
Figura 10- Uso e ocupação do solo agrupados da bacia hidrográfica do rio Morno	32
Figura 11- Ocupação e uso do solo discretizado por sub-bacias.....	33
Figura 12- Exemplo de sessão transversal estimada pelo MDT 1 m.	35
Figura 13- Risco hidrodinâmico para cada faixa etária.....	37
Figura 14- Hietogramas de chuva excedente concebidas pelo PDDR.	38
Figura 15- Totais acumulados de chuva excedente para regime de chuvas atual.	40
Figura 16- Hietograma de chuva excedente para regime de chuvas levando em consideração mudanças climáticas	41
Figura 17- Acumulado de chuva excedente para regime de chuvas levando em consideração as mudanças climáticas	43
Figura 18- Hidrogramas incrementais por sub-bacia para evento modelado a partir do PDDR.	46
Figura 19- Hidrogramas incrementais por sub-bacia para evento modelado levando em consideração as mudanças climáticas.....	47
Figura 20- Hidrogramas estimados para a bacia hidrográfica do Rio Morno, referente a um evento de 25 anos de tempo de retorno: a) chuva de projeto do PDDR e b) IDF mudanças climáticas	50
Figura 21- Mancha de inundação para regime de chuvas atual.....	52
Figura 22- Detalhamento de área ocupada por cada classe de profundidade.....	53

Figura 23- Risco hidrodinâmico estimado para inundação concebida pelo regime de chuvas atual	54
Figura 24- subdivisão da área exposta ao risco hidrodinâmico para regime de chuvas atual.	54
Figura 25- Profundidade estimada levando em consideração as mudanças climáticas.....	55
Figura 26- Distribuição de profundidade x área para regime de chuvas com mudanças climáticas.....	56
Figura 27- Comparativo entre o barramento artificial ocasionado pela BR-101.	57
Figura 28- Risco hidrodinâmico estimado para inundação levando em consideração as mudanças climáticas.	58
Figura 29- Subdivisão da área exposta ao risco hidrodinâmico para regime de chuvas considerando as mudanças climáticas	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Bairros inseridos na bacia hidrográfica do Rio Morno e suas respectivas áreas (ha).	21
Tabela 2 - Indicadores sociais dos bairros inseridos na bacia hidrográfica do Rio Morno	24
Tabela 3- Área das sub-bacias discretizadas	31
Tabela 4- Classes de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Morno.	32
Tabela 5 -Valores de CN e abstração inicial para cada uso do solo.	34
Tabela 6 - Coeficientes de Manning para cada uso do solo.	36
Tabela 7- Coeficientes de escoamento para eventos de chuva de projeto modelados.....	44
Tabela 8- Detalhamento de parâmetros para os hidrogramas de projeto analisados.	49
Tabela 9- Valores estimados de vazão de pico e tempo de pico para dois cenários de chuva de	50

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	11
2.1.	Objetivo geral	11
2.2.	Objetivos específicos	11
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1	Águas urbanas	12
3.2	Inundações ribeirinhas	13
3.3	Modelagem computacional de inundações	14
3.3.1	Modelagem hidrológica	14
3.3.2	Modelagem hidrodinâmica	16
3.4	Mudanças climáticas e seus impactos	17
4.	METODOLOGIA	20
4.1.	Fluxograma metodológico	20
4.2.	Área de estudo	20
4.1.1	Histórico De Inundações na cidade do Recife	22
4.1.2	População em estado de vulnerabilidade social	24
4.2	Modelo digital de terreno	25
4.3	Tipos de solo	27
4.4	Estimativa do tempo de concentração	27
4.5	Eventos de chuva modelados	28
4.6.1	Evento de projeto para regime de chuvas atual	28
4.6.2	Evento de projeto levando em consideração as mudanças climáticas	29
4.6	Modelo hidrológico HEC-HMS	30
4.6.1	Discretização das bacias	30
4.6.2	Uso e ocupação do solo	32
4.6.3	Chuva Excedente	33
4.6.4	Método de propagação de vazão	34
4.7	Modelo hidrodinâmico HEC-RAS	35
4.8	Coeficiente de Manning	36
4.9	Risco hidrodinâmico	36
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Chuva excedente por sub-bacias	38

5.2	Hidrogramas discretizados por sub bacia	45
5.3	Hidrogramas de projeto	49
5.4	Manchas de inundação	51
6.	CONCLUSões E RECOMENDAÇÕES	60
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A resposta hidrológica de um sistema fluvial a um evento de precipitação é o aumento no nível d'água nesse corpo hídrico. Geralmente, o fluxo de água gerado pela chuva em uma bacia hidrográfica fica contido no leito do canal principal, contudo, em eventos de cheia de maior magnitude, ocorre o aumento demasiado do nível d'água que pode transbordar e inundar áreas adjacentes ao rio (Paz, 2010).

As inundações são fenômenos esperados em determinadas condições climáticas e topográficas, porém seus impactos representam grandes transtornos na vida cotidiana da população, principalmente daqueles mais vulneráveis socialmente. Nas últimas décadas, tem-se observado um agravamento significativo dos efeitos associados às inundações urbanas, principalmente em função da ocupação desordenada do solo, da impermeabilização progressiva das superfícies e da ausência de infraestrutura de drenagem eficaz (Tucci, 2005). Além da ausência de planejamento e políticas públicas voltadas ao enfrentamento e solução dos problemas ambientais, particularmente aqueles ligados aos eventos extremos, porém não totalmente imprevisíveis, como cheias e secas.

Compreender a dinâmica das inundações em bacias urbanas, bem como sua interação com o meio físico e a ocupação humana, constitui uma atribuição fundamental do planejamento urbano ambiental. Nesse contexto a modelagem hidrológica e hidrodinâmica tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o entendimento, a previsão e o gerenciamento de inundações em ambientes urbanos e rurais (Kreibich et al., 2022).

Enquanto os modelos hidrológicos são responsáveis por estimar a resposta da bacia às precipitações, os modelos hidrodinâmicos complementam a análise ao representar a movimentação das águas ao longo da rede de drenagem, possibilitando a estimativa de lâminas d'água e manchas de inundação com maior detalhamento espacial (Tucci, 2005).

A combinação dessas modelagens permite uma abordagem mais integrada e precisa, sendo amplamente utilizada no suporte ao planejamento urbano, elaboração de projetos de drenagem e sistemas de alerta. Além disso, com o avanço das tecnologias de geoprocessamento e a maior disponibilidade de dados altimétricos de alta resolução, a exemplo dos obtidos por LiDAR (Light Detection and Ranging), tornou-se possível aprimorar significativamente a representação dos elementos físicos de uma bacia e a acurácia dos resultados simulados (Mendes et al., 2022). Por meio dessas abordagens, é possível simular a geração e a propagação do escoamento superficial, identificar áreas de risco e propor estratégias eficazes de mitigação de impactos.

O objetivo deste trabalho foi simular a geração de hidrogramas de cheia e a estimativa de manchas de inundação de uma bacia do rio Morno, com 22 km² localizada na cidade do Recife, área com problemática recorrente de inundações, considerando tanto eventos de projeto padrão quanto cenários influenciados pelas mudanças climáticas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Comparar cenários de inundação na bacia hidrográfica do rio Morno, localizada em Recife-PE, por meio da aplicação de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, considerando eventos de chuva de projeto tanto para o regime climático atual quanto para condições futuras associadas às mudanças climáticas.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar hidrogramas de projeto tanto para regime de chuvas atual quanto para regime de chuvas considerando as mudanças climáticas.
- Estimar áreas inundáveis para eventos de projeto padrão e levando em consideração as mudanças climáticas.
- Analisar as manchas de inundação estimadas com relação ao risco hidrodinâmico associado a elas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Águas urbanas

Segundo Tucci (2008), águas urbanas englobam o conjunto de processos e serviços relacionados ao uso da água no meio urbano, incluindo o abastecimento, coleta e tratamento de esgoto, e o manejo das águas pluviais. Esses elementos estão inseridos no contexto do ciclo hidrológico, que, ao ser alterado pelas transformações do ambiente construído, apresenta modificações em processos como infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. O autor destaca que a urbanização modifica profundamente esses fluxos naturais, principalmente devido à impermeabilização do solo. Nesse cenário, a relação entre população e água torna-se cada vez mais crítica, especialmente pela sobrecarga dos sistemas urbanos de saneamento e drenagem. Tucci (2008) no referido trabalho ressalta a importância de uma gestão integrada e sustentável das águas urbanas, com enfoque no planejamento, uso racional dos recursos hídricos e valorização da água como elemento central da qualidade ambiental e da saúde pública.

Souza et al. (2012) introduziram o paradigma do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID – Low Impact Development) como alternativa às abordagens tradicionais de drenagem. Os autores discutem como a evolução histórica do manejo das águas nas cidades, marcada inicialmente por estratégias higienistas voltadas à rápida evacuação das águas pluviais e servidas, resultou em sérios impactos ao ciclo hidrológico, como aumento do escoamento superficial, redução da infiltração, degradação da qualidade da água e prejuízos à saúde pública e ao meio ambiente.

A abordagem LID propõe a reconexão entre o ambiente urbano e os processos hidrológicos naturais, incentivando o uso de técnicas que mimetizam a dinâmica do solo e da vegetação, como telhados verdes, pavimentos permeáveis, biorretenções, valas de infiltração e coletores de água da chuva. Além disso, enfatiza-se o papel do planejamento urbano integrado à bacia hidrográfica, com base em características locais como topografia, tipo de solo, cobertura vegetal e padrões de uso do solo. Essa filosofia promove o controle da água na fonte, em pequena escala, reduzindo os impactos negativos do adensamento urbano e promovendo a sustentabilidade das águas urbanas.

Os autores destacam que a implementação de sistemas LID, além de promover benefícios ambientais e sociais, pode reduzir custos de manutenção e infraestrutura no médio e longo prazo. No entanto, sua adoção em larga escala ainda demanda esforços de capacitação técnica, revisão institucional e incentivo à participação social. Assim, o estudo reforça que a gestão

eficiente das águas urbanas deve ir além das obras convencionais, incorporando práticas sustentáveis, multifuncionais e integradas às dinâmicas cotidianas da cidade.

Kreibich et al. (2022), afirmam que os desafios da gestão de águas urbanas no futuro estão profundamente relacionados ao aumento da frequência e intensidade de eventos hidrológicos extremos, impulsionados pelas mudanças climáticas. O estudo analisa 45 pares de eventos de cheias e secas ao redor do mundo e demonstra que, embora a gestão de riscos tenha evoluído e contribuído para a redução da vulnerabilidade, os impactos ainda crescem em eventos sem precedentes. Isso ocorre porque a infraestrutura existente, a exemplos de diques, reservatórios e sistemas de drenagem, possuem limites de projeto que são frequentemente excedidos por eventos extremos. Assim, Kreibich et al. (2022) enfatizam a necessidade de abordagens de gestão mais proativas, integrando governança eficaz, investimentos robustos em medidas estruturais e não estruturais, e sistemas avançados de alerta e resposta, para enfrentar a crescente imprevisibilidade dos eventos hidrológicos urbanos.

3.2 Inundações

As inundações ribeirinhas são eventos naturais caracterizados pela saída das águas dos rios e corpos d'água de seu leito regular, ocupando áreas de várzea em função da superação da capacidade de escoamento dos canais naturais durante períodos de intensas chuvas (TUCCI, 2004). Embora historicamente façam parte do ciclo hidrológico, sua recorrência e impacto vêm se agravando com a urbanização desordenada, sobretudo em países periféricos, onde a expansão urbana ocorre frequentemente sobre áreas de risco e sem o devido planejamento territorial (TUCCI; BERTONI, 2003). A ocupação das margens fluviais, a impermeabilização crescente do solo urbano e a canalização inadequada dos cursos d'água intensificam o volume e a velocidade do escoamento superficial, aumentando significativamente a frequência e severidade das inundações (TUCCI, 2007).

Tal cenário revela não apenas uma crise ambiental, mas um problema social e de saúde pública, uma vez que essas áreas são majoritariamente ocupadas por populações de baixa renda, com pouca infraestrutura e grande vulnerabilidade socioeconômica (TUCCI, 2003). Além dos prejuízos materiais e humanos diretos, essas inundações contribuem para a degradação dos corpos hídricos, devido ao carreamento de resíduos sólidos, esgoto in natura e poluentes difusos, intensificando o ciclo de contaminação urbana (TUCCI, 2005; TUCCI; BERTONI, 2003). A ausência de políticas públicas efetivas, integradas e sustentáveis para o gerenciamento das inundações ribeirinhas perpetua esse quadro crítico, em que soluções estruturais isoladas

muitas vezes apenas transferem o problema para áreas jusantes, em vez de preveni-lo (TUCCI, 2005).

3.3 Modelagem computacional

Tucci (2005) define a modelagem computacional como uma ferramenta que visa representar, por meio de equações e algoritmos, os processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, permitindo a simulação do comportamento hidrológico e hidráulico do sistema em resposta a diferentes condições de entrada. Segundo o autor, a modelagem atua como um instrumento de apoio à análise, planejamento e gestão dos recursos hídricos, especialmente útil em situações que envolvem previsão de escoamento superficial, dimensionamento de estruturas hidráulicas e avaliação de cenários futuros, como eventos extremos e mudanças no uso do solo.

Ao incorporar dados ambientais, parâmetros físicos e técnicas numéricas, os modelos computacionais possibilitam a compreensão integrada do funcionamento do ciclo hidrológico, sendo particularmente relevantes no contexto urbano, onde a complexidade dos escoamentos e a rápida resposta das bacias demandam análises detalhadas e em escala compatível com a realidade local.

Complementando essa perspectiva, Melo, Cabrera e Wendland (2017) destacam a importância da modelagem computacional na estimativa da recarga subterrânea, utilizando balanço hídrico e modelos transientes de fluxo para avaliar diferentes usos agrícolas e suas implicações nos aquíferos.

Além disso, Andrade, Rosman e Azevedo (2019) aplicaram a modelagem computacional para analisar características temporais e de qualidade da água na Baía de Guanabara, evidenciando a utilidade dessas técnicas em estudos ambientais complexos.

Por fim, Sanders Neto (2019) desenvolveu uma modelagem computacional do transitório hidráulico em redes de distribuição de água, utilizando o método lagrangeano das ondas características, demonstrando a eficácia da modelagem em simular fenômenos complexos como o golpe de aríete.

3.3.1 Modelagem hidrológica

Tucci (2005) define os modelos hidrológicos como representações matemáticas dos processos físicos do ciclo hidrológico, os quais possibilitam simular a resposta de uma bacia frente a diferentes cenários de precipitação e uso do solo. Esses modelos são fundamentais para a compreensão e previsão do comportamento hidrológico, especialmente em ambientes

urbanos, onde a crescente impermeabilização altera significativamente o regime de escoamento superficial. Nesse sentido, a modelagem hidrológica atua como ferramenta estratégica para o planejamento urbano, prevenção de desastres e gestão de recursos hídricos.

Ferreira et al. (2025) investigaram os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo no comportamento hidrológico das sub-bacias dos ribeirões Fojo e Perdizes, localizadas em Campos do Jordão (SP), utilizando o método Curve Number (CN) integrado a ferramentas de geoprocessamento. A pesquisa aplicou imagens de uso e cobertura da terra do MapBiomas para os anos de 2002 e 2022, quantificando uma redução de áreas florestais (6% e 18% nas sub-bacias Perdizes e Fojo, respectivamente) e aumento significativo da urbanização. As simulações hidrológicas demonstraram aumento das vazões de pico, especialmente para tempos de retorno de 50 e 100 anos, atingindo 18 m³/s no Fojo e 7 m³/s no Perdizes. O estudo também evidenciou redução do tempo de concentração, intensificação do escoamento superficial e maior sensibilidade da bacia Fojo, devido à sua declividade e expansão urbana. Os autores destacam a eficácia do método CN na identificação de áreas críticas e no suporte ao planejamento ambiental, embora ressaltem suas limitações quanto à calibração local e ausência de séries temporais observacionais.

Mendonça et al. (2021) aplicaram redes neurais artificiais (RNAs) para modelagem chuva-vazão em uma sub-bacia do Rio Guamá, na Amazônia. O estudo comparou as arquiteturas duas métricas que operaram com métrica R² e RMSE ótimos. A modelagem considerou o uso de dados históricos de uma década, tratados e normalizados, e posteriormente o modelo foi calibrado. A arquitetura de redes neurais se mostrou especialmente eficaz devido à sua capacidade de incorporar defasagens temporais, o que capturou com mais precisão a dinâmica hidrológica da bacia — caracterizada por solos profundos, baixa declividade e relevante contribuição do escoamento subsuperficial. O modelo demonstrou potencial para aplicação em bacias com escassez de dados, com destaque para a importância da auto-regressividade nas previsões, evidenciada pelas análises de contribuição relativa das variáveis de entrada.

Rolim et al. (2020) desenvolveram um modelo estatístico simplificado para a calibração de curvas-chave de vazão em postos fluviométricos sujeitos ao efeito de remanso, com aplicação na sub-bacia do rio Tapajós, no município de Itaituba (PA). A abordagem adotada desconsiderou correções pela declividade da linha d'água, utilizando análise de regressão linear múltipla com dados de níveis fluviométricos de Itaituba e Santarém, obtidos da base da agência nacional de águas e saneamento (ANA).

Os autores destacam que a variação sazonal do nível do rio, associada ao remanso causado pelo rio Amazonas, interfere diretamente na confiabilidade das curvas-chave, sendo a modelagem hidrológica uma alternativa eficaz para ajustar essas instabilidades. A equação calibrada demonstrou boa aderência aos dados observados, inclusive em extremos de vazão, indicando aplicabilidade em regiões com baixa densidade de monitoramento fluviométrico.

3.3.2 Modelagem hidrodinâmica

Tucci (2005) define modelagem hidrodinâmica como o processo de simulação do escoamento de água em canais, rios ou sistemas urbanos, por meio da aplicação de equações que representam o movimento da água, geralmente a partir das equações de Saint-Venant. Essa abordagem permite uma análise detalhada do comportamento das vazões e dos níveis d'água ao longo do tempo e do espaço, sendo essencial para o planejamento e mitigação de riscos associados a inundações. Os modelos hidrodinâmicos podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, a depender do grau de complexidade e da representação da geometria do escoamento (Tucci, 2005).

No estudo de Silva et al. (2021), a modelagem hidrodinâmica com uso do HEC-RAS foi aplicada ao rio Tapajós, com a finalidade de avaliar os riscos hídricos a partir da simulação de eventos extremos. Os autores utilizaram séries históricas de quatro estações fluviométricas, associadas a perfis transversais interpolados e dados de elevação do SRTM. A calibração e validação do modelo apresentaram excelentes índices de desempenho ($R^2 > 0,99$), e os resultados mostraram que mesmo pequenas variações na cota resultam em significativas alterações na área molhada, indicando a importância da modelagem para o planejamento e a mitigação de desastres.

Mendes et al. (2022) aplicaram o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, integrado a um conjunto de dados LiDAR e ferramentas de SIG, para simular inundações urbanas em Goiânia (GO), evidenciando a eficácia da modelagem baseada em MDTs de alta resolução. O estudo identificou trechos críticos de transbordamento e validou os resultados com dados de campo, apresentando coeficiente de desempenho superior a 0,8. A calibração considerou o aumento da rugosidade por assoreamento e vegetação, demonstrando a utilidade da modelagem hidrodinâmica no planejamento urbano e na mitigação de riscos.

Ferreira et al. (2021) aplicaram um modelo integrado de escoamento e qualidade da água, utilizando o HEC-RAS em regime não-permanente, para simular o comportamento hidrodinâmico e de transporte de poluentes ao longo dos rios Paranapanema e Itararé. A

modelagem abrangeu mais de 1.000 km de rios com influência de reservatórios em cascata, incorporando dados batimétricos e de Modelo Digital de Elevação (MDE), com o objetivo de apoiar o processo de enquadramento de corpos hídricos, segundo a legislação brasileira. A simulação foi conduzida com base nas equações de Saint-Venant e na equação de Advecção-Dispersão-Reação (ADR), permitindo representar o transporte de poluentes como DBO, N, P e OD ao longo da calha fluvial e nos trechos de reservatório. As simulações apresentaram alto desempenho na propagação das vazões (coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,9) e boa capacidade de replicar padrões de concentração observados para os parâmetros de qualidade da água, com destaque para a DBO.

Urbani et al. (2023) aplicaram modelagem hidrológica e hidráulica, por meio dos softwares HEC-HMS e HEC-RAS, para delimitar manchas de inundação na bacia do Córrego do Ipiranga (SP). A calibração foi realizada com base em 11 eventos chuva-vazão, resultando em picos de vazão até 10% superiores aos simulados inicialmente. As áreas inundadas variaram de 1,79 a 2,21 km² para tempos de retorno de 10, 25 e 100 anos, afetando até 3.854 edificações, principalmente de padrão construtivo popular. Os resultados mostraram boa concordância com dados observacionais e reforçam a importância da calibração e do uso de dados geoespaciais de alta resolução. O estudo destaca o valor da modelagem integrada para apoiar o planejamento urbano e a mitigação de riscos hidrológicos.

3.4 Mudanças climáticas e seus impactos

As mudanças climáticas representam variações nas condições atmosféricas médias ao longo de períodos extensos, sendo fenômenos naturais registrados ao longo da história do planeta. No entanto, atualmente, o termo (mudanças climáticas) é comumente associado às alterações no clima global induzidas por atividades antrópicas, especialmente o aumento das emissões de gases de efeito estufa, que intensificam o aquecimento global (Teixeira, 2019).

O planejamento urbano, responsabilidade direta dos gestores públicos, desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, dado que as áreas urbanas concentram a maior parte da população global e das atividades econômicas, além de atraírem modos de transporte com alto potencial poluidor. Dessa forma, as estratégias de planejamento urbano e as políticas públicas adotadas pelos poderes instituídos são essenciais para a minimização das emissões de gases de efeito estufa e para a adaptação aos impactos decorrentes das alterações climáticas (Teixeira, 2019).

Schöntag e Muza (2024) realizaram um estudo aprofundado sobre o impacto das mudanças climáticas nas curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da precipitação na região noroeste do Rio Grande do Sul. Utilizando dados de precipitação observada (1961–2021) e projeções climáticas para o período de 2021 a 2040, os autores compararam dois métodos de desagregação de chuvas: o da CETESB (1979) e o de Robaina e Peiter (1992), concluindo que o segundo gera parâmetros mais realistas para a região. As curvas IDF foram ajustadas utilizando a distribuição de Gumbel e a equação do tipo Chen, demonstrando, em todos os modelos e cenários climáticos analisados (SSP370 e SSP585 com CanESM5 e MIROC6), uma tendência de redução da intensidade da precipitação futura. Os autores destacam que essa redução, embora possa levar ao superdimensionamento de estruturas hidráulicas projetadas com base em dados passados, reforça a importância da atualização constante das curvas IDF frente às mudanças climáticas.

Zákhia et al. (2021) realizaram uma aplicação do modelo hidrológico distribuído MHD-INPE acoplado a projeções climáticas regionalizadas pelo modelo Eta/CPTEC, com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas na Bacia do Ribeirão Jaguará (BHRJ), no sul de Minas Gerais. A simulação considerou os cenários RCP4.5 e RCP8.5, utilizando os modelos climáticos HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2. Após a correção de viés, os autores observaram tendência de aumento das temperaturas e redução da precipitação ao longo do século XXI. A performance do MHD-INPE foi considerada satisfatória, com NSE acima de 0,7 na calibração e validação, embora tenha havido dificuldades na simulação de picos e recessões. As análises baseadas na curva de permanência mostraram reduções nas vazões mínimas e máximas projetadas, com destaque para o modelo Eta-CanESM2 sob RCP8.5, que indicou até 92,97% de redução nas vazões mínimas. Por fim, a análise pelo método de Budyko apontou risco crescente de escassez hídrica na região, com mudanças no índice de aridez indicando limitação da evapotranspiração pelo fornecimento de água.

Rodrigues et al. (2024) atualizaram as curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para o município do Recife-PE, frente aos cenários de mudanças climáticas projetados até o ano de 2100, utilizando o modelo climático global MIROC6 do CMIP6. O estudo contemplou os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, e demonstrou que, embora se projete uma redução da precipitação anual — especialmente acentuada no cenário SSP5-8.5, com redução de até 22,75% —, as chuvas de curta duração devem apresentar intensidades significativamente maiores. Esse comportamento, evidenciado pelas curvas IDF ajustadas por algoritmo genético,

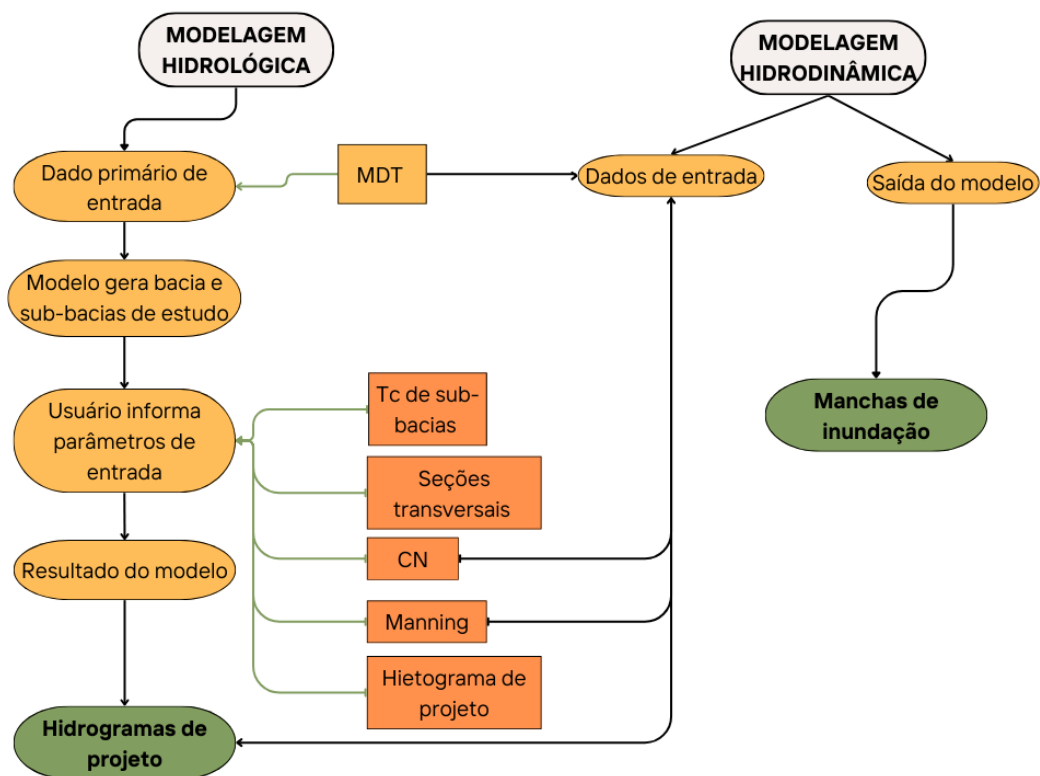
indica maior severidade de eventos extremos em menor tempo, podendo sobrecarregar o sistema de drenagem urbana e aumentar os riscos de alagamentos e inundações.

4. METODOLOGIA

4.1. Fluxograma metodológico

O presente estudo se dividiu em duas etapas, modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica a fim de estimar hidrogramas de cheia e manchas de inundação. A Figura 1 representa de maneira didática as etapas metodológicas do trabalho.

Figura 1- Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Autor, 2025.

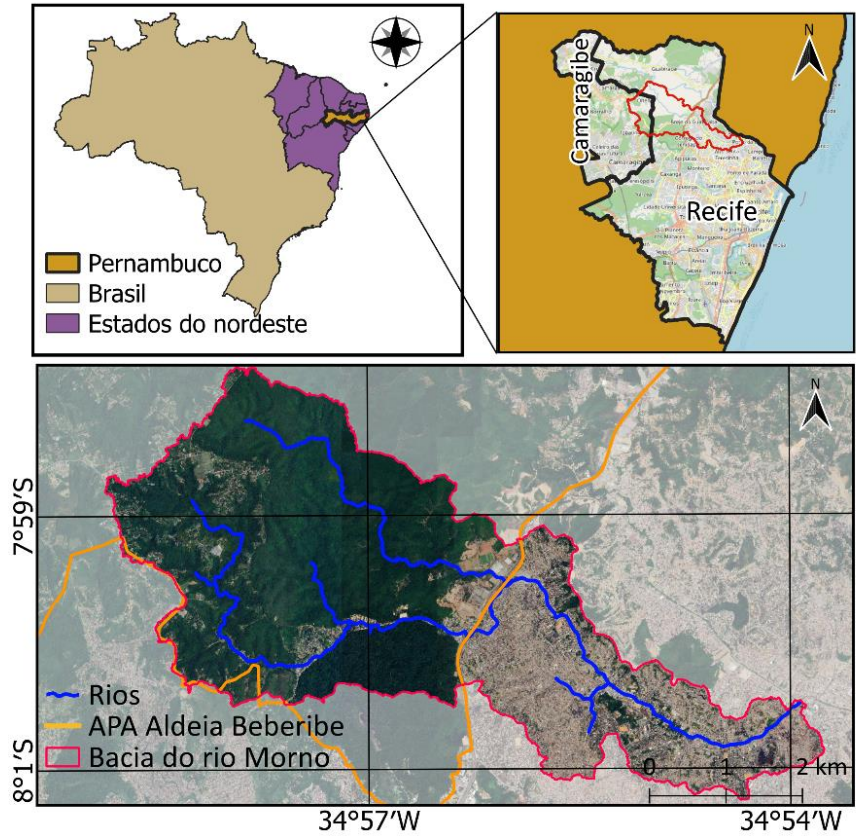
4.2. Área de estudo

A área de estudo do presente documento foi a bacia hidrográfica do Rio Morno, localizada nos municípios de Camaragibe (porção norte) e, em sua maior parte, em Recife, nas coordenadas 7°58'32.26"S e 34°58'50.44"W (Camaragibe) e 8°0'8.43"S e 34°53'56.77"W (Recife) (IBGE, 2022) (Figura 2). Compreendendo uma área de aproximadamente 22 km², a bacia hidrográfica está inserida, em sua cabeceira, na Área de Proteção Ambiental (APA) Aldeia-Beberibe (SNUC, 2025). Por essa razão, a área a montante da bacia é, em sua maioria, vegetada.

Ainda, a bacia hidrográfica possui menos de 20% de sua área inserida no município de Camaragibe, enquanto mais de 80% encontra-se na cidade do Recife. A porção com maior

elevação da área de estudo está localizada em Camaragibe, o que reduz significativamente a suscetibilidade a inundações nesse setor.

Figura 2- Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Morno



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, decidiu-se por restringir a análise da dinâmica das inundações à zona urbana do Recife, englobando 17 bairros (Tabela 1).

Tabela 1- Bairros inseridos na bacia hidrográfica do Rio Morno e suas respectivas áreas (ha).

Bairro	Área (ha)
Dois Unidos	122.96
Guabiraba	881.19
Pau Ferro	3.54
Dois Irmãos	164.77
Passarinho	77.95
Beberibe	18.05
Linha do Tiro	77.21
Brejo da Guabiraba	72.40
Alto José Bonifácio	18.23
Vasco da Gama	57.09
Alto Santa Terezinha	1.95
Macaxeira	23.34
Brejo de Beberibe	64.33
Nova Descoberta	147.27
Água Fria	1.06
Córrego do Jenipapo	18.54

Fonte: Autor, 2025.

Vale salientar que os nomes dos bairros, muitas vezes, elucidam a relação que historicamente o Recife construiu com o regime de águas que marca a cidade. Bairros com nomes como “brejo”, “córrego”, “alto”, além de referência direta a outro rio da cidade, o Beberibe, do qual o rio Morno é afluente, mostram claramente a importância que os corpos de água têm para a formação histórica do Recife.

Dentre os bairros da bacia do rio Morno, destacam-se Guabiraba, com a maior área inserida na bacia (881.19 ha), e Água Fria, com a menor (1.06 ha). Bairros como Dois Irmãos (164.77 ha), Nova Descoberta (147.27 ha) e Dois Unidos (122.96 ha) também representam áreas significativas da bacia. A variação nas áreas ocupadas indica que a maioria dos bairros estão apenas parcialmente inseridos na bacia hidrográfica, com exceção de Brejo de Beberibe e Brejo da Guabiraba, que estão totalmente inseridos em sua extensão. O Rio Morno é o principal afluente do Rio Beberibe, sendo esse um dos mais importantes cursos d'água que corta a cidade do Recife. A ocupação da área remonta, no mínimo, ao século XIX, período em que foi implantado, na região atualmente correspondente ao bairro de Linha do Tiro, um campo destinado ao treinamento militar. (Cavalcanti, 1998).

De acordo com as Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020, publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Recife apresenta uma precipitação média anual de 2438,4 mm. Os meses mais chuvosos são abril, maio, junho e julho, com médias mensais de 335,1 mm, 387,1 mm, 389,5 mm e 388,9 mm, respectivamente. Já os meses mais secos são outubro, novembro e dezembro, registrando médias de 63,7 mm, 38,5 mm e 46,1 mm, respectivamente. Esses dados refletem a distribuição sazonal das chuvas na região, com um período chuvoso concentrado no outono e inverno.

4.1.1 Histórico De Inundações na cidade do Recife

Segundo dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e registros do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED/UFSC, 2013), o município do Recife é um dos mais afetados por eventos hidrológicos extremos em Pernambuco, apresentando recorrência de inundações e alagamentos causados por chuvas intensas. Entre 1991 e 2012, o Recife registrou 79 ocorrências classificadas como desastres naturais, sendo 41 delas inundações, conforme dados do IBGE (2018). As áreas mais críticas concentram-se nos bairros da Zona Norte e Zona Oeste da cidade, como Casa Amarela,

Mustardinha, Iputinga e Afogados, onde há maior densidade populacional em áreas de baixa altitude.

Destaca-se, historicamente, a enchente de julho de 1975, amplamente reconhecida como a maior catástrofe natural da história do Recife. Entre os dias 17 e 18, chuvas intensas provocaram o transbordamento dos rios Capibaribe e Beberibe, resultando na inundação de aproximadamente 80% da área urbana da cidade. O desastre causou a morte de 107 pessoas e deixou cerca de 350 mil desabrigados, afetando profundamente a infraestrutura urbana e a vida cotidiana da população (Metsul, 2022; NE10, 2022).

Enfatiza-se também, o evento de maio de 2022, considerado um dos mais severos da história recente da capital pernambucana. Segundo a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), em apenas 48 horas choveu 258 mm, superando a média esperada para o mês inteiro (227 mm). O evento resultou em 64 mortes na Região Metropolitana, sendo 34 delas no Recife, além de centenas de desalojados e diversos pontos de alagamento severo. O transbordamento de canais urbanos e a saturação do solo foram fatores decisivos na magnitude dos danos observados (APAC, 2022).

No mês de janeiro de 2025, um novo episódio de chuvas intensas voltou a impactar significativamente a Região Metropolitana do Recife, com destaque para o transbordamento dos rios Tejiipió e Morno. De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), entre os dias 12 e 13 de janeiro, foram registrados 118 mm de precipitação acumulada em apenas 12 horas, superando a média histórica esperada para todo o mês de janeiro, que varia entre 80 e 100 mm. O volume extremo de chuvas gerou alagamentos em diversos bairros das zonas Norte e Oeste da capital, deixando moradores ilhados, danificando residências e interrompendo serviços essenciais, como transporte público e fornecimento de energia elétrica (G1 Pernambuco, 2025).

Na bacia do Rio Morno, os efeitos foram particularmente críticos nos bairros de Dois Unidos e Linha do Tiro, onde o aumento repentino do nível d'água causou o colapso de estruturas urbanas, como pontes e passarelas. A força da correnteza derrubou grades de proteção, invadiu residências e deixou ruas intransitáveis. Em resposta aos danos e à recorrência de alagamentos, moradores locais chegaram a realizar protestos, bloqueando vias públicas em reivindicação por soluções estruturais permanentes. Esses eventos reforçam a vulnerabilidade da bacia do Rio Morno frente a episódios de precipitação concentrada, agravada pela ocupação desordenada, ausência de infraestrutura de contenção e limitações nos sistemas de drenagem urbana (APAC, 2025; g1 Pernambuco, 2025).

4.1.2 População em estado de vulnerabilidade social

Os bairros presentes na bacia apresentam renda domiciliar baixa (Tabela 2), caracterizando assim as comunidades inseridas na bacia como comunidades nível moderado e moderada alto grau de vulnerabilidade social (FGV, 2024).

Tabela 2 - Indicadores sociais dos bairros inseridos na bacia hidrográfica do Rio Morno

Bairro	Densidade populacional	Renda domiciliar	Nível de Vulnerabilidade	Classe Social
Dois unidos	105.15	937.92	Moderada a alta	Classe D
Guabiraba	1.35	1159.26	Moderada	Classe C
Pau ferro	0.41	7735.06	Muito baixa / inexistente	Classe A
Dois irmãos	4.58	1936.10	Moderada	Classe C
Passarinho	51.80	824.02	Moderada a alta	Classe D
Beberibe	180.95	1038.23	Moderada a alta	Classe D
Linha do tiro	181.38	1028.96	Moderada a alta	Classe D
Brejo da guabiraba	155.94	1037.66	Moderada a alta	Classe D
Alto José Bonifácio	219.32	908.76	Moderada a alta	Classe D
Vasco da gama	193.08	1165.90	Moderada	Classe C
Alto santa Terezinha	251.64	921.74	Moderada a alta	Classe D
Macaxeira	162.83	1387.01	Moderada	Classe C
Brejo de Beberibe	128.90	1058.37	Moderada a alta	Classe D
Nova descoberta	187.58	898.39	Moderada a alta	Classe D
Água fria	225.73	1118.92	Moderada	Classe C
Córrego do jenipapo	161.67	1068.84	Moderada a alta	Classe D

Fonte: Adaptado IBGE e FGV, 2025.

Destaca-se que apenas o bairro Pau Ferro é pertencente a classe social A e vale destacar que esse bairro apresenta a menor densidade populacional e menor área, indicando uma alta concentração de renda. Os demais bairros da área de estudo são pertencentes as classes sociais C e D, por isso, pode-se afirmar que as comunidades presentes nessa bacia hidrográficas estão em alta vulnerabilidade social (Figura 3).

Figura 3- Situação atual do rio Morno- a) Presença de resíduos sólidos no leito do rio; b) ocupações irregulares nas margens do rio



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

4.2 Modelo digital de terreno

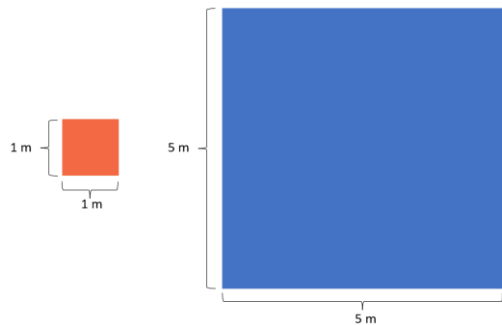
O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação numérica da topografia terrestre, normalmente estruturada em formato raster, onde cada pixel armazena o valor da elevação em relação a um referencial vertical (Paz, 2024).

Modelos digitais de elevação podem ser obtidos por meio de levantamentos de tecnologia LiDAR, essa metodologia destaca-se pela alta precisão na representação altimétrica do relevo. A tecnologia utiliza pulsos de laser emitidos por sensores aerotransportados, gerando nuvens de pontos tridimensionais com múltiplos retornos, o que permite distinguir entre vegetação, edificações e o solo (Dong e Chen, 2018). A partir desses dados, derivam-se o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT).

Nesse estudo foi utilizado um MDT com resolução espacial de 1 m, disponibilizado pelo projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D), uma iniciativa do governo do Estado de Pernambuco que visa a aquisição de dados espaciais de alta precisão para subsidiar o planejamento urbano e a gestão territorial. Foram utilizadas tecnologias avançadas de levantamento aerofotogramétrico e perfilamento a laser (LiDAR), o projeto produziu ortofotos na escala 1:5.000 e MDTs com erro altimétrico inferior a 25 cm.

Entretanto, dados LiDAR exigem altos custos de armazenamento e processamento para serem trabalhados, por essa razão, optou-se por degradar o MDT de 1 m para 5 m (Figura 4) ocasionando uma redução de 25 vezes o tamanho das imagens raster, passando de 64.310.400 pixels para apenas 2.572.416 pixels. Apesar da degradação aplicada, o MDT em questão ainda é considerado de alta resolução (Paz, 2024).

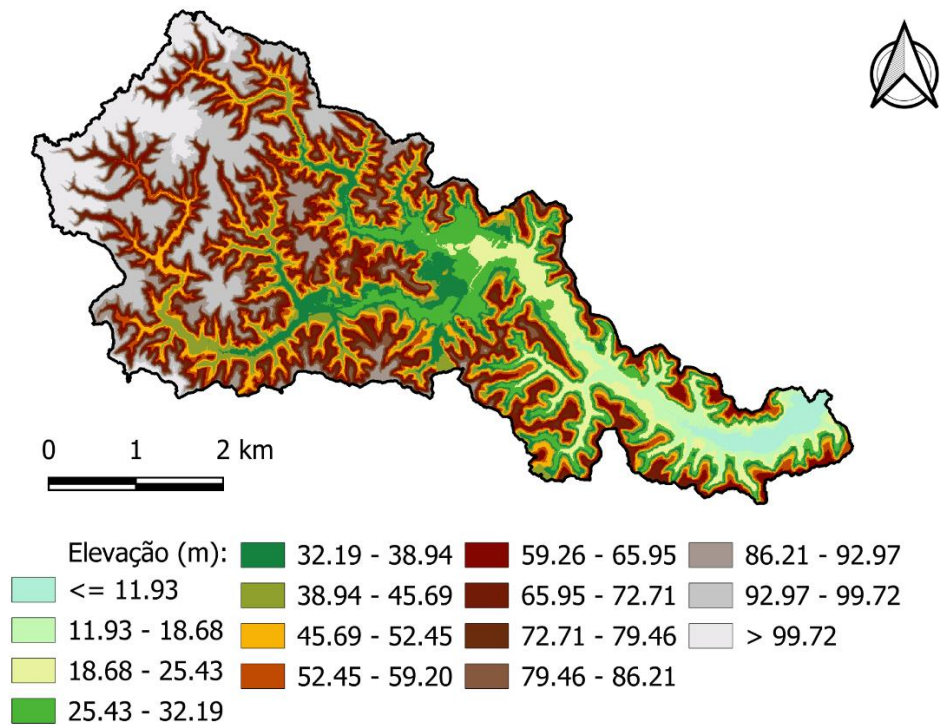
Figura 4- Representação esquemática do impacto da degradação da resolução espacial de um píxel.



Fonte: Autor, 2025.

A distribuição altimétrica da bacia hidrográfica do Rio Morno, representada por classes de elevação pode ser conferida na Figura 5.

Figura 5- Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Morno.



Fonte: Autor, 2025.

A análise hipsométrica da bacia revela uma variação de altitudes que vai de aproximadamente 12 metros até mais de 99 metros. As áreas de menor elevação concentram-se na porção leste da bacia, coincidente com a região urbana do Recife, onde predominam

altitudes inferiores a 25 metros. Em contrapartida, as maiores altitudes localizam-se na porção oeste, no município de Camaragibe, ultrapassando 90 metros.

4.3 Tipos de solo

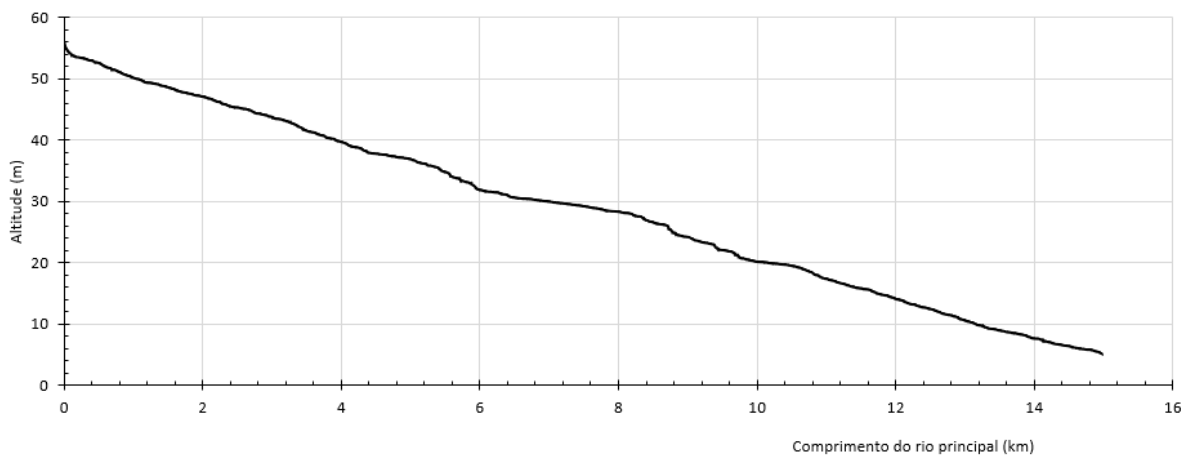
A caracterização dos solos da bacia foi feita a partir do produto cartográfico disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com escala de detalhamento de 1:5.000. Foi identificado que o único tipo de solo presente na área de estudo é o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, um solo com baixa fertilidade natural, comum em regiões tropicais (EMBRAPA, 2021).

Adotou-se o método Curve Number (CN), desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS), para a estimativa de escoamento superficial. Nessa abordagem, os solos são agrupados em 4 grupos (A, B, C e D), conforme sua capacidade de infiltração e produção de escoamento. A sequência dos grupos reflete o aumento do escoamento superficial e a diminuição gradual da capacidade de infiltração dos solos, respectivamente. De acordo com estudos de Sartori et al. (2005), pelas características do tipo de solo da região, o grupo hidrológico adotado foi o C, representando uma baixa a moderada taxa de infiltração e um escoamento superficial relativamente elevado.

4.4 Estimativa do tempo de concentração

Pela análise do perfil longitudinal do rio principal (Figura 6) identificou-se que a bacia apresenta um comportamento topográfico relativamente homogêneo ao longo do canal principal, sem variações acentuadas de declividade.

Figura 6- Perfil longitudinal do rio principal.



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, o tempo de concentração (T_c) foi estimado por meio da equação de Kirpich (Eq. 1), considerando o trecho completo do rio, sem subdivisões. A escolha do método foi seguindo as recomendações do Plano Diretor de Drenagem do Recife (2016) para bacias hidrográficas de pequeno porte.

$$t_c = 0.95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{Eq. 1})$$

O L representa o comprimento do curso d'água principal (km) e o H a diferença de altitude em metros ao longo do curso da d'água principal, resultando em um T_c estimado para a bacia do rio Morno de 4,46 horas.

4.5 Eventos de chuva modelados

Foram modelados dois eventos de chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos. O primeiro considerou a Curva de Intensidade Duração e Frequência (IDF) recomendada pelo Plano Diretor de Drenagem do Recife (PDDR, 2016), a qual foi elaborada seguindo o procedimento básico estatístico a partir dos registros de chuva existentes na região. Já o segundo evento, teve como base a curva IDF proposta por Rodrigues *et al.* (2024), que considerou o impacto da variabilidade das mudanças climáticas no regime de chuva da cidade do Recife. A escolha do tempo de retorno de 25 anos foi seguindo a recomendação do PDDR para estudos hidrológicos na região e padronizado para os dois eventos. As respectivas informações são discutidas a seguir.

4.6.1 Evento de projeto para regime de chuvas atual

Para o regime de chuvas atuais, a IDF aplicada foi a proposta pelo PPDR (2016) (Eq. 2).

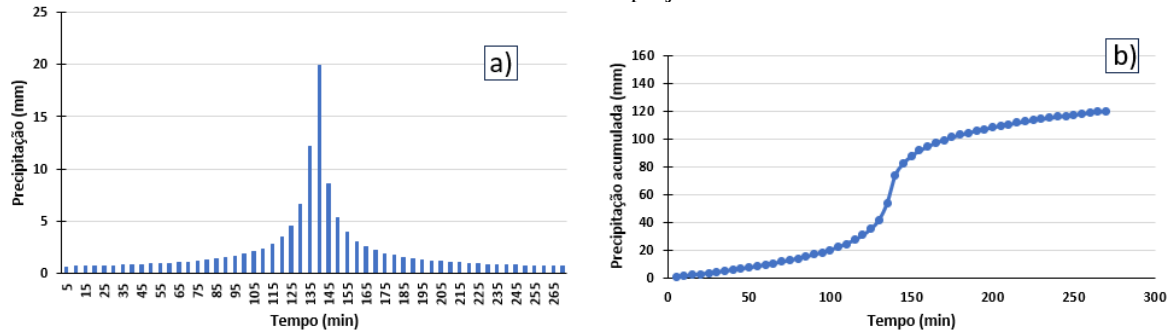
$$i = \frac{991.3142 \cdot Tr^{0.1763}}{(t+9.5745)^{0.7424}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que, i é a intensidade da chuva (mm/h), Tr representa o tempo de retorno em anos e t é a duração da chuva em minutos.

Foi considerada uma duração de chuva de 4,5 h (270 min) por ser um evento um pouco maior que o tempo de concentração estimado da bacia, essa chuva foi discretizada de 5 em 5

minutos (Figura 7-a) e organizados pelo método dos blocos alternados. O que gerou uma precipitação acumulada de aproximadamente 120 mm (Figura 7-b).

Figura 7- Precipitação de projeto para o regime de chuvas atual. a) Hietograma de projeto; b) Precipitação acumulada de projeto



Fonte: Autor, 2025.

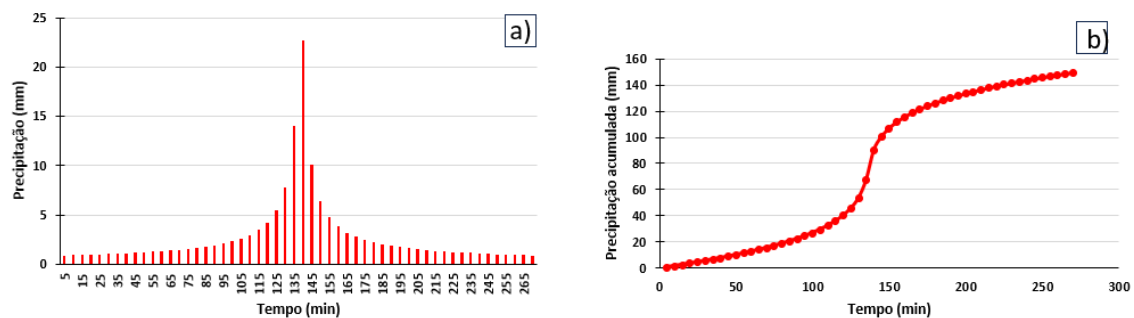
4.6.2 Evento de projeto levando em consideração as mudanças climáticas

Para a análise da resposta hidrológica da bacia considerando cenários futuros de precipitação associados às mudanças climáticas, foi utilizada a curva IDF ajustada proposta por Rodrigues et al. (2024) (Eq. 3). A equação foi desenvolvida com base nas projeções abrangendo o período de 2015 a 2100. Os parâmetros dessa equação seguem a mesma descrição apresentada na Equação 2.

$$i = \frac{1010.33 \cdot Tr^{0.176}}{(t+9.215)^{0.707}} \quad (\text{Eq. 3})$$

A aplicação da nova curva também considerou uma precipitação com duração de 270 minutos, discretizada de 5 em 5 minutos e com tempo de retorno de 25 anos (Figura 8-a). A curva ajustada resultou em um acumulado pluviométrico de aproximadamente 150 mm (Figura 8-b), aproximadamente 30 mm a mais do que o evento concebido pelo PDDR.

Figura 8- Precipitação de projeto levando em consideração as mudanças climáticas. a) Hietograma de projeto; b) Precipitação acumulada de projeto



Fonte: Autor, 2025.

4.6 Modelo hidrológico HEC-HMS

Os hidrogramas de cheia foram estimados por meio do modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), desenvolvido para simular os principais processos hidrológicos em bacias hidrográficas com rede de drenagem ramificada. A ferramenta permite a realização de simulações tanto para eventos isolados quanto para séries temporais contínuas, incorporando rotinas como infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, propagação hidrológica e balanço de umidade do solo. Com ambiente de trabalho integrado e interface gráfica amigável, o HEC-HMS facilita a construção, calibração e análise dos modelos, sendo amplamente aplicado em estudos de drenagem urbana, previsão de cheias, disponibilidade hídrica e projetos de controle de inundações (USACE, 2016).

Para o presente estudo, o modelo HEC-HMS foi alimentado com as precipitações de projeto como principal variável climática de entrada, além dos dados físicos da bacia, como elevação, declividade, rede de drenagem, uso e ocupação do solo e grupo hidrológico dos solos. Considerando que o cenário modelado corresponde a eventos de curta duração, e dado o foco na resposta do escoamento superficial imediato, processos como evapotranspiração e percolação foram desconsiderados nas simulações. Além disso, por se tratar de um evento sintético e devido à indisponibilidade de dados observados de vazão para fins de calibração e validação, essas etapas foram suprimidas na modelagem hidrológica.

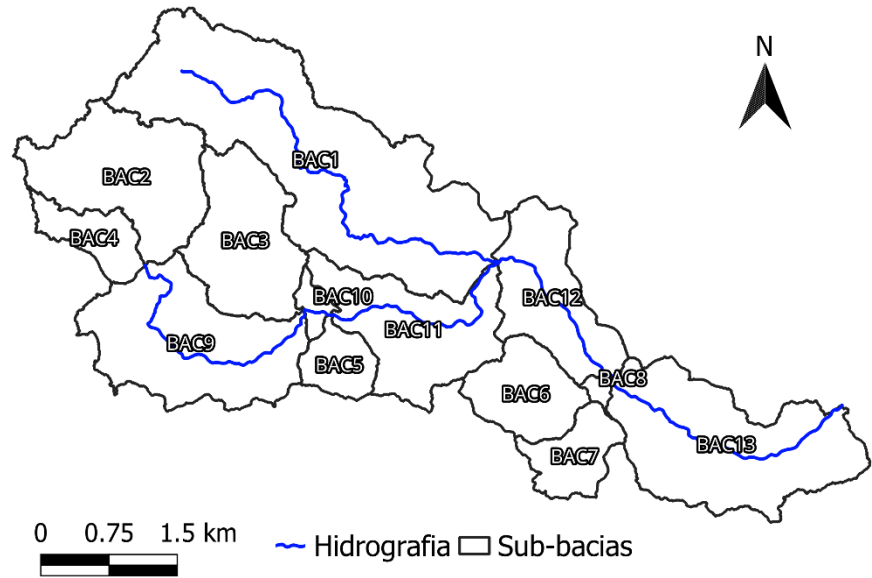
4.6.1 Discretização das bacias

O HEC-HMS é um software de modelagem hidrológica que representa a bacia hidrográfica por meio da subdivisão espacial por sub-bacias, seguindo a estrutura da rede de drenagem principal. Em cada sub-bacia delimitada, os parâmetros hidrológicos são assumidos como uniformes, simplificando a simulação dos processos de escoamento e infiltração (Tucci, 2005).

Para a delimitação da rede drenagem, adotou-se como critério inicial uma área mínima de contribuição de 0,5 km² para a definição do início do rio, valor compatível com a escala de bacias de pequeno porte. No entanto, essa delimitação automática foi posteriormente refinada por meio da análise de imagens de satélite, a fim de eliminar trechos onde, apesar da área acumulada atender ao critério adotado, não havia presença de drenagem visível, evitando a representação de canais inexistentes na hidrografia real.

Ao final foram identificadas 13 sub-bacias (Figura 9) contidas na bacia hidrográfica do rio Morno, essas tiveram a nomenclatura atribuída como BACX, em que X é o número da sub-bacia.

Figura 9- Discretização da bacia hidrográfica adotada para o modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Autor, 2025.

A distribuição de área das sub-bacias pode ser conferida na Tabela 3.

Tabela 3- Área das sub-bacias discretizadas

Sub-bacia	Área (km²)	Área relativa (%)
BAC1	5.62	26%
BAC2	2.19	10%
BAC3	1.80	8%
BAC4	0.60	3%
BAC5	0.52	2%
BAC6	1.03	5%
BAC7	0.70	3%
BAC8	0.08	0%
BAC9	2.64	12%
BAC10	0.18	1%
BAC11	1.94	9%
BAC12	1.61	7%
BAC13	3.04	14%

Fonte: Autor, 2025.

A partir da análise das áreas das sub-bacias, observa-se que a bacia 1 se destaca por ser a maior de todas, com aproximadamente 5,6 km², enquanto as demais sub-bacias apresentam áreas mais uniformes, com média de 1,6 km².

4.6.2 Uso e ocupação do solo

Para a caracterização do uso e cobertura do solo, foi utilizada a coleção MapBiomas 10 Metros beta, a partir de imagens do satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 metros. A imagem selecionada refere-se ao ano de 2022 (Souza et al. 2020). Para o ano de 2022, foram identificadas 8 classes de uso e ocupação do solo (Tabela 4).

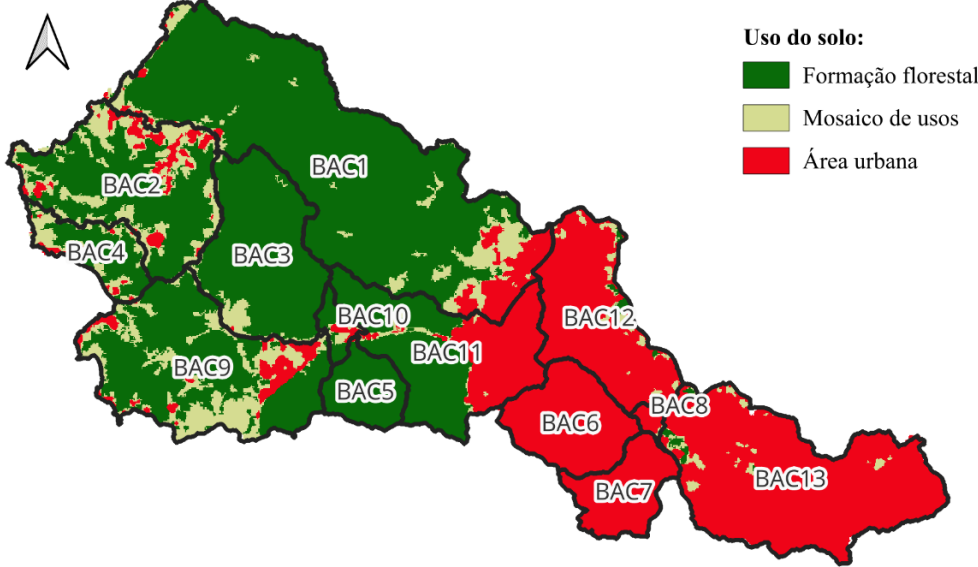
Evidentemente, apenas as classes Formação Florestal, Mosaico de Usos e Área Urbana, somadas, representam 98,3% de toda a área de estudo. Assim, houve um agrupamento das classes, considerando a conformidade de características entre os usos do solo (Figura 10), nomeadas conforme aquelas que ocupam a maior área.

Tabela 4- Classes de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Morno.

Classe de uso	Percentual
Formação florestal	44.2%
Banhados	0.1%
Pastagem	1.3%
Lavouras temporárias	0.2%
mosaico de uso	22.3%
área urbana	31.8%
outras áreas não vegetadas	0.1%

Fonte: Autor, 2025.

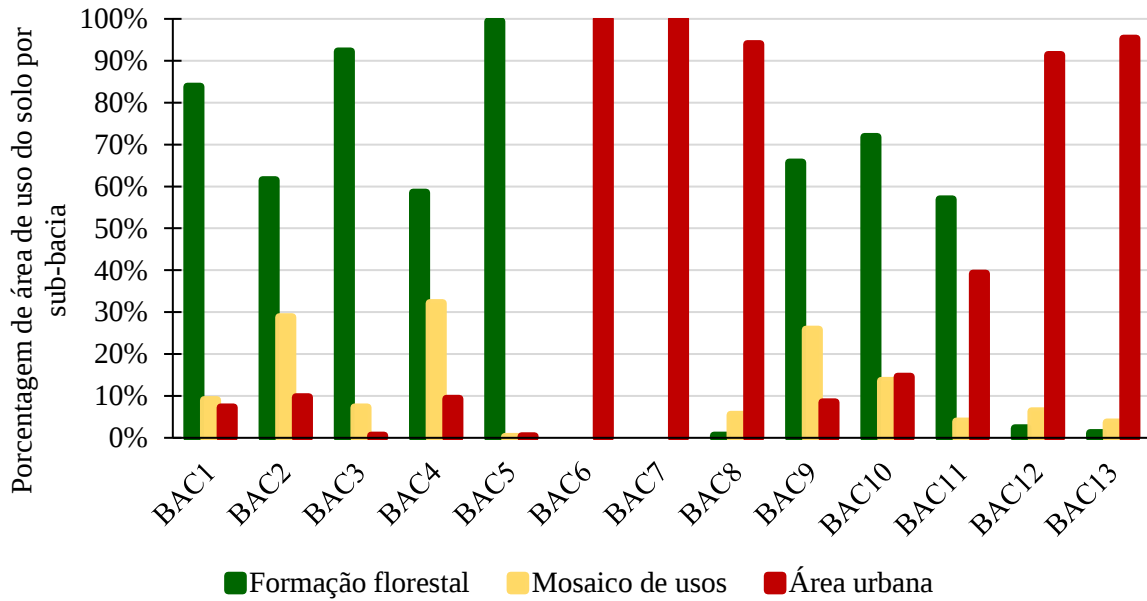
Figura 10- Uso e ocupação do solo agrupados para bacia hidrográfica do rio Morno



Fonte: Autor, 2025.

A partir da discretização das sub-bacias foi possível definir quais classes de uso do solo são as majoritárias para cada sub-bacia da área de estudo (Figura 11).

Figura 11- Ocupação e uso do solo discretizado por sub-bacias.



Fonte: Autor, 2025.

A partir da análise da Figura 11, observa-se que as sub-bacias 1, 2, 3, 4 e 5, bem como, em menor proporção, as sub-bacias 9, 10 e 11, apresentam predominância de cobertura vegetal, o que favorece o armazenamento de água da chuva e a maior infiltração durante eventos de precipitação. Em contrapartida, as sub-bacias 6, 7, 8, 12 e 13 são caracterizadas por elevados níveis de impermeabilização, o que contribui para o aumento do escoamento superficial e redução da recarga hídrica no solo.

4.6.3 Chuva Excedente

Para estimar a fração da lâmina d'água precipitada que se infiltra no solo e aquela que contribui para o escoamento superficial, adotou-se o método Curve Number (CN), desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS) (Eq. 4). Esse método baseia-se em um modelo de balanço hídrico que considera duas premissas fundamentais: (i) a razão entre o volume de escoamento superficial e o volume máximo potencial de escoamento é equivalente à razão entre a infiltração acumulada e a infiltração máxima possível; (ii) as perdas iniciais correspondem a 20% da infiltração máxima acumulada (Collischonn e Dornelles, 2015).

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que o índice P é a precipitação, Q é o escoamento superficial, Ia são as perdas iniciais, F é a infiltração e S a máxima infiltração acumulada.

A vazão de escoamento por esse método então é definida pela Equação 5.

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \text{ quando } P > Ia \text{ e } Q = 0 \text{ quando } P \leq Ia \quad (\text{Eq. 5})$$

Os valores de S são regidos pela equação empírica e dependentes do valor CN . A equação que define os valores de S é a Equação 6.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Eq. 6})$$

Para a o presente estudo, os valores de CN foram associados de acordo com o uso da terra e grupo hidrológico do solo, considerando a condição de umidade antecedente II e os valores recomendados por Tucci (2005) (Tabela 4).

Tabela 5 - Valores de CN e abstração inicial para cada uso do solo.

Classe	CN	Abstração inicial
Formação Florestal	60	33.87
Mosaico de Usos	70	21.77
Área urbana	90	5.64

Fonte: Autor, 2025.

Além disso, o escoamento de cada sub-bacia foi analisado a partir do coeficiente de escoamento (Ce), que é definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado representando uma medida adimensional que varia entre 0 e 1. Valores próximos a 0 indicam maior capacidade de infiltração do solo e maior armazenamento de água, enquanto valores próximos a 1 correspondem a áreas com alta impermeabilização ou baixa capacidade de infiltração.

4.6.4 Método de propagação de vazão

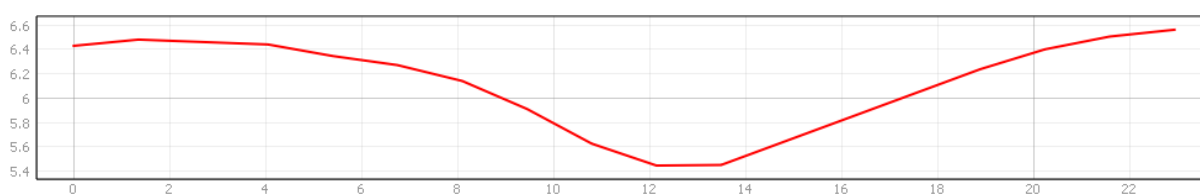
O método escolhido para propagação de vazão em rios foi o Muskingum-Cunge. Derivado do modelo de Muskingum clássico, esse método incorpora fundamentos da hidráulica por meio da aproximação da equação da continuidade, aliada a parâmetros físicos do canal, como declividade, rugosidade e seção transversal. Por sua formulação relativamente simples e baixo custo computacional, tornou-se uma opção eficiente para representar os processos de translação

e atenuação da onda de cheia em modelos hidrológicos distribuídos ou semi-distribuídos (Pontes e Collischonn, 2012).

Para a propagação de vazões pelo método Muskingum-Cunge, é necessário informar as seções transversais do rio, para definição da geometria do canal possibilitando assim a estimativa da velocidade da onda de cheia e a capacidade de armazenamento do escoamento.

As seções transversais para esta simulação foram estimadas a partir do MDT LiDAR com resolução espacial de 1 metro (Figura 12), a fim de obter largura e profundidade do rio, para inserção no modelo hidrológico. Entretanto, devido a limitação do sensor LiDAR em capturar a batimetria de corpos d'água (Paz, 2024), as dimensões obtidas foram apenas aproximações.

Figura 12- Exemplo de sessão transversal estimada pelo MDT 1 m.



Fonte: Autor, 2025.

4.7 Modelo hidrodinâmico HEC-RAS

HEC-RAS é um sistema de modelagem hidráulica capaz de simular o escoamento em uma e duas dimensões, em regime permanente e não permanente, abrangendo redes de canais, planícies de inundação e leques aluviais. O modelo permite a realização de cálculos de perfis de superfície d'água, simulações de fluxo subcrítico, supercrítico e misto, bem como análises de transporte de sedimentos e qualidade da água, utilizando uma estrutura comum de dados geométricos e rotinas computacionais hidráulicas. Além disso, o HEC-RAS possibilita a realização de mapeamento de inundações com base nos resultados das simulações, por meio do ambiente RAS Mapper. A partir da geometria do modelo e dos perfis de superfície d'água calculados, é possível gerar mapas de profundidade de inundação e delimitações de áreas alagadas. O RAS Mapper também permite a criação de dados geoespaciais adicionais, como velocidade do escoamento, tensão de cisalhamento, energia do fluxo, espessura de gelo e zonas de restrição à planície de inundação (USACE, 2021).

Para o presente estudo, o HEC-RAS foi utilizado para a realização das simulações hidrodinâmicas em regime não permanente, em duas dimensões, com o objetivo de estimar os parâmetros de inundação na área de estudo. As simulações foram conduzidas com base na

propagação dos hidrogramas de projeto, gerados no modelo hidrológico HEC-HMS, sobre o MDT da bacia.

Para a delimitação da área de simulação 2D, utilizou-se o contorno da bacia hidrográfica com a aplicação de um buffer de 1000 m, a fim de assegurar que todas as células da malha computacional estivessem compreendidas na área de análise.

A discretização espacial adotada no modelo hidrodinâmico corresponde à resolução do MDT, de 5 metros. Para a estimativa das manchas de inundação, foram inseridos os hidrogramas incrementais de cada sub-bacia, gerados previamente no modelo hidrológico HEC-HMS, os quais foram utilizados como condição de contorno a montante. A condição de contorno a jusante foi definida como *normal depth*, definida como sumidouro com o objetivo de permitir a saída do fluxo da área simulada.

O passo de tempo para os cálculos hidrodinâmicos foi adaptativo, controlado pela condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), a fim de definir um passo de tempo que não causasse instabilidades na simulação e garantisse que o balanço de massa fosse satisfeito a cada Δt (Fan et al., 2021). Assim foi adotado um passo de tempo mínimo de 20 s para toda a simulação.

4.8 Coeficiente de Manning

Para o cálculo de propagação da onda de cheia na superfície foi necessária a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning, parâmetro que representa a resistência ao escoamento nas diferentes classes de uso e cobertura do solo presentes na bacia. Esse coeficiente influencia na simulação da velocidade do fluxo, da profundidade da lâmina d'água e, conseqüentemente, na delimitação das áreas inundáveis. Os valores utilizados na simulação foram obtidos a partir de referências da literatura técnica (Papaioannou *et al.*, 2018) (Tabela 5).

Tabela 6 - Coeficientes de Manning para cada uso do solo.

Classe	Manning
Formação Florestal	0.1
Mosaico de Usos	0.035
Área urbana	0.013

Fonte: Autor, 2025.

4.9 Risco hidrodinâmico

O risco hidrodinâmico é caracterizado pela combinação dos efeitos da profundidade e da velocidade do escoamento sobre elementos expostos durante eventos de inundação, sendo um dos principais indicadores da severidade física associada à dinâmica da água em movimento.

Essa abordagem considera que a força exercida pelo fluxo pode comprometer a estabilidade de pessoas, veículos, edificações e demais estruturas urbanas, sendo especialmente crítica em áreas densamente ocupadas. A quantificação desse risco é comumente realizada por meio do produto entre a profundidade da lâmina d'água (m) e a velocidade do escoamento (m/s), resultando em uma medida expressa em m^2/s , denominada de *DV (depth × velocity)*. Essa métrica permite classificar zonas inundadas conforme diferentes níveis de ameaça, desde condições seguras até perigo extremo. Diretrizes como as do *Australian Rainfall and Runoff Project* (ARR, 2010) estabelecem limiares para essa variável, relacionando valores específicos de profundidade e velocidade, a diferentes graus de instabilidade para faixas populacionais distintas (adultos, crianças, idosos), incorporando fatores como fluviabilidade, arraste e resistência ao escorregamento (Figura 13). Dessa forma, a análise hidrodinâmica assume papel central na modelagem de inundações, não apenas na delimitação das áreas alagadas, mas também na avaliação do potencial de danos físicos diretos (ARR, 2010).

Figura 13- Risco hidrodinâmico para cada faixa etária.

DV (m^2/s)	Bebês, crianças pequenas e pessoas frágeis/Idosos	Crianças	Adultos
0	seguro	Seguro	Seguro
0-0.4	Risco extremo	baixo risco	baixo risco
0.4-0.6		risco significativo	
0.6-0.8		Risco Extremo	Risco moderado
0.8-1.2			Risco significativo
>1.2			Risco extremo

Fonte: Adaptado de ARR, 2010.

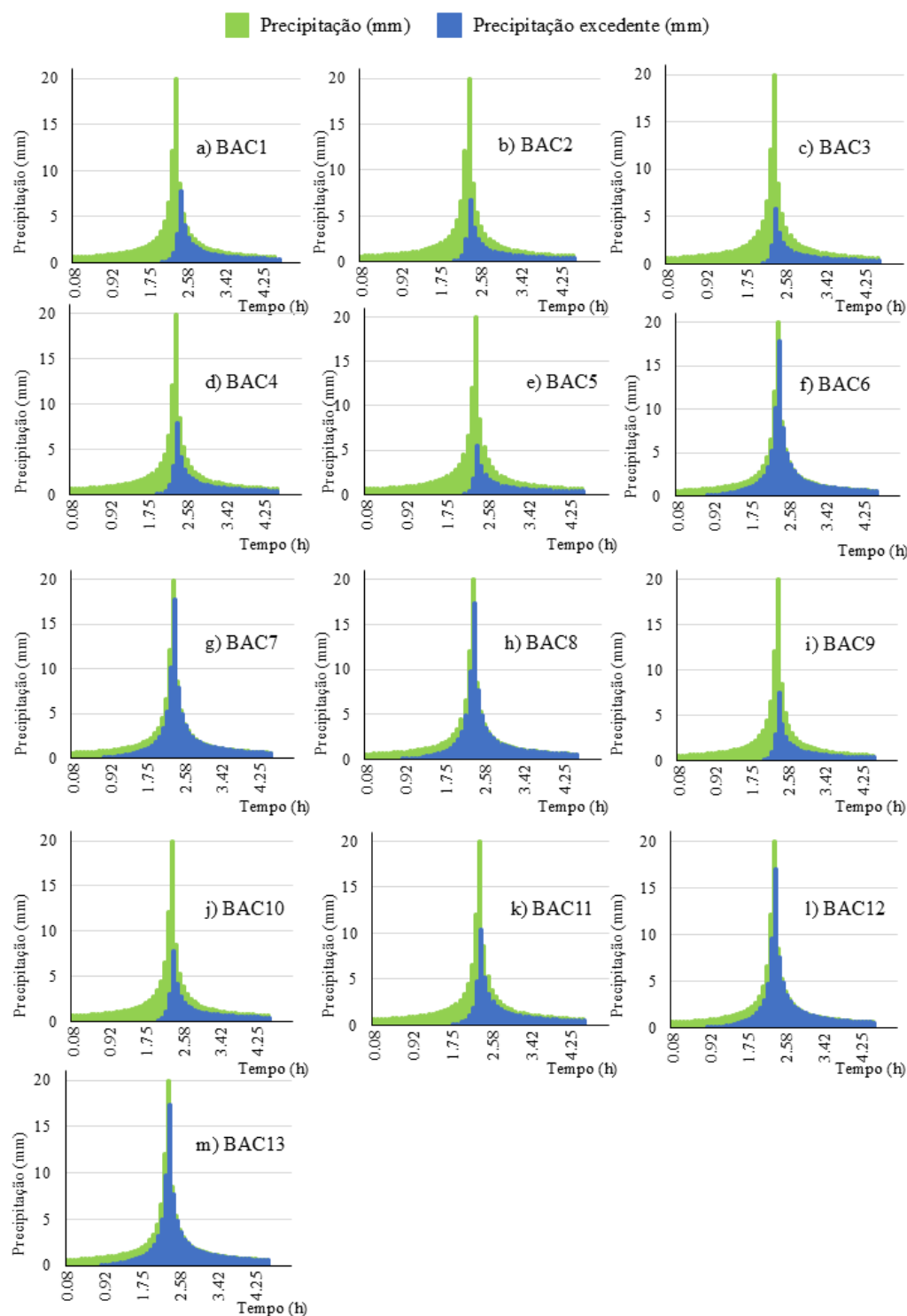
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Chuva excedente por sub-bacias

- Chuva excedente para regime climático atual

A Figura 14 apresenta a chuva excedente obtida a partir da IDF do PDDR, discretizada pelas 13 sub-bacias do modelo hidrológico.

Figura 14- Hietogramas de chuva excedente concebidas pelo PDDR.



Fonte: Autor, 2025.

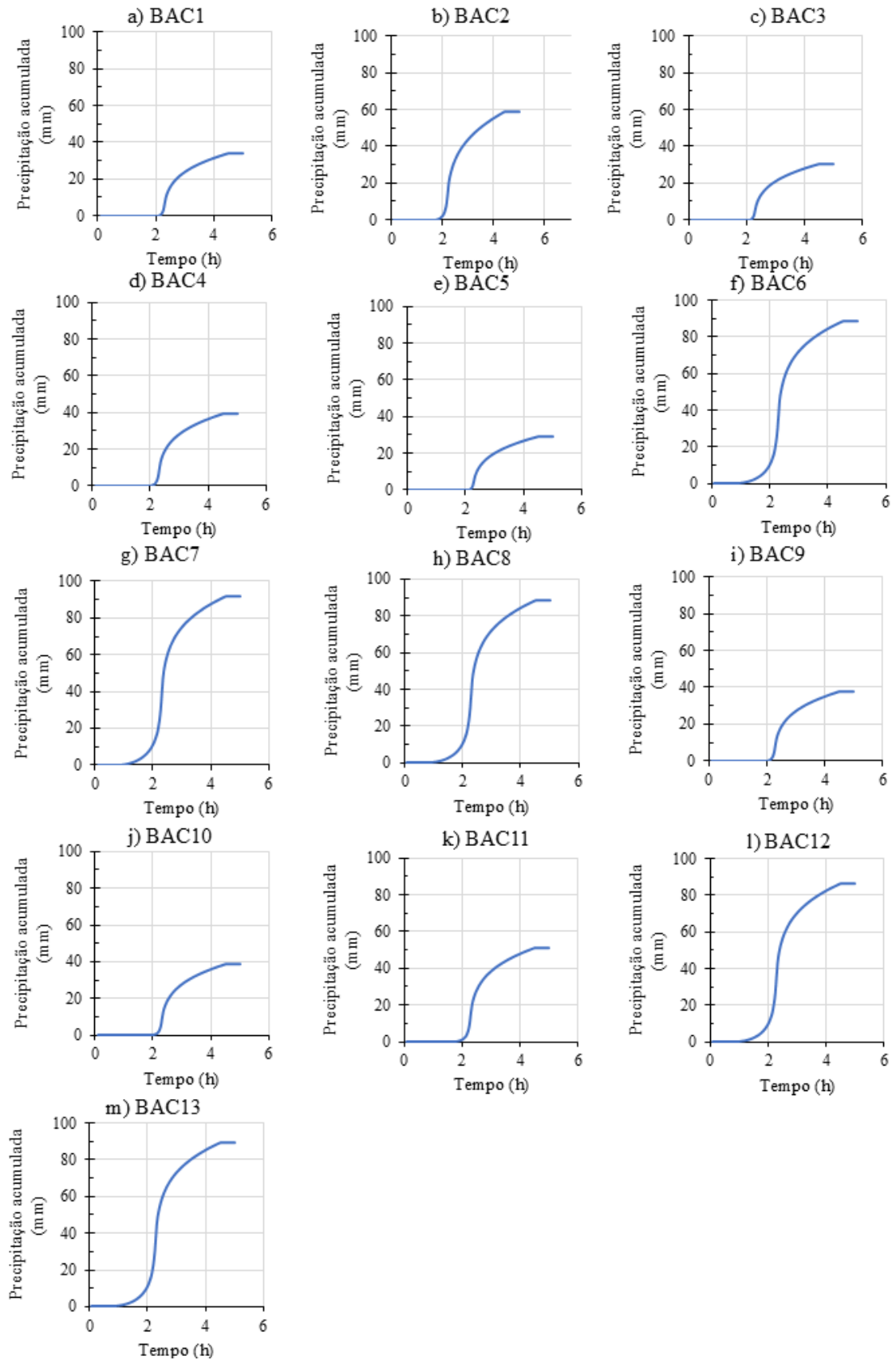
Os gráficos apresentados comparam a precipitação total e a precipitação excedente ao longo do tempo nas treze sub-bacias (BAC1 a BAC13), evidenciando a resposta hidrológica diferenciada de cada unidade à ocorrência de um evento extremo de curta duração. Sub-bacias como BAC7, BAC8, BAC 12 e BAC13 apresentaram volumes de precipitação excedente próximos à precipitação total, sugerindo baixa capacidade de infiltração e maior potencial de geração de escoamento superficial, o que pode ser explicado por essas bacias apresentarem maior área urbanizada. Por outro lado, as bacias BAC1, BAC2 e BAC3 revelaram maior retenção hídrica, com menor volume de excedente, evidenciando a maior cobertura vegetal. A identificação dessas diferenças é fundamental para o entendimento da vulnerabilidade hidrológica da bacia hidrográfica do rio Morno. Os totais acumulados de chuva excedente para esse evento podem ser conferidos na Figura 15.

De modo geral, observa-se que a maioria das sub-bacias apresentou uma acumulação de lâmina excedente depois das 2 h do início do evento, refletindo o atraso típico entre o início da precipitação e a geração efetiva de escoamento. As curvas das sub-bacias BAC5, BAC6, BAC7, BAC8, BAC12 e BAC13 se destacam por apresentarem maior acúmulo total de precipitação excedente (acima de 80 mm), com um crescimento quase exponencial nos primeiros 2 a 3 horas, indicando baixa capacidade de retenção do solo.

As sub-bacias BAC1, BAC2, BAC3, BAC4, BAC9, BAC10 e BAC11 apresentaram acumulados menores, entre 30 mm e 60 mm, com um crescimento mais gradual da curva acumulada. Essas unidades coincidem com as bacias que demonstraram maior retenção hídrica, apresentando maior cobertura vegetal e menor grau de impermeabilização.

O destaque permanece com a sub-bacia BAC13, que apresentou o maior volume acumulado de precipitação excedente, superior a 90 mm, refletindo um cenário de maior carga hídrica e, conseqüentemente, maior risco potencial de escoamento superficial e processos erosivos.

Figura 15- Totais acumulados de chuva excedente para regime de chuvas atual.

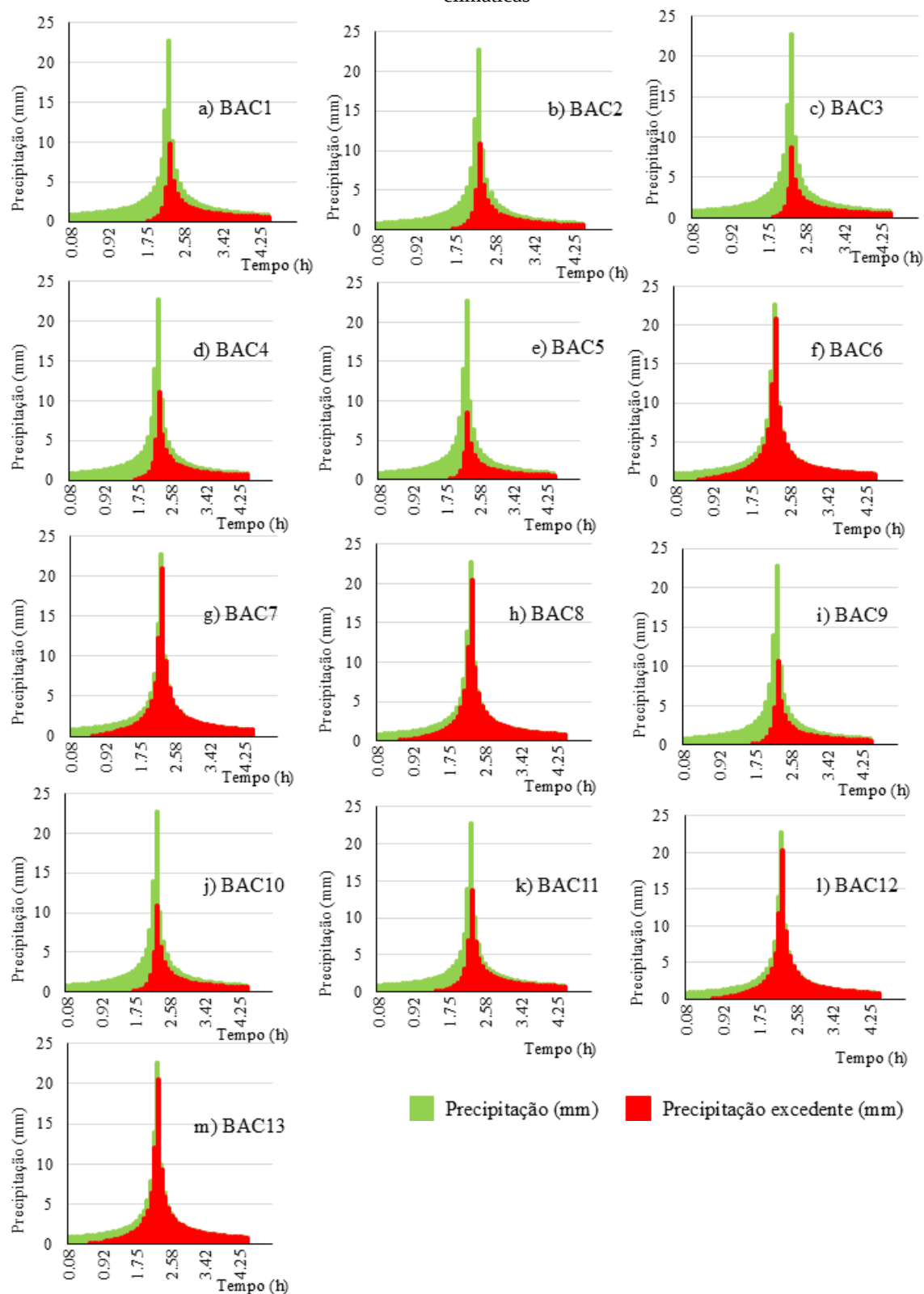


Fonte: Autor, 2025.

- Chuva excedente para regime de chuvas levando em consideração as mudanças climáticas

É possível conferir na Figura 16, a chuva excedente para o evento levando em consideração as mudanças climáticas.

Figura 16-Hietograma de chuva excedente para regime de chuvas levando em consideração mudanças climáticas



Fonte: Autor, 2025.

No evento de chuva gerado pela curva IDF ajustada para cenários de mudanças climáticas, observa-se um comportamento intensificado da precipitação excedente em todas as sub-bacias da área de estudo. As sub-bacias BAC5, BAC6, BAC7, BAC8, BAC12 e BAC13 se destacam por apresentarem os maiores volumes totais de precipitação excedente, com lâminas que se aproximam muito da precipitação total ao longo de quase todo o evento. Isso reflete a baixa capacidade de infiltração, associado à maior presença de áreas urbanizadas e ao uso intensivo do solo nessas regiões. Nessas bacias, o escoamento superficial se forma rapidamente após o pico de chuva, com destaque para a BAC13, que apresenta os maiores volumes de lâmina excedente.

As sub-bacias BAC1, BAC2, BAC3 e BAC4 apresentam comportamento mais moderado, com picos de precipitação bem definidos, mas com excedentes proporcionalmente menores em relação ao total precipitado. Ainda assim, nota-se um aumento da lâmina excedente em comparação ao evento anterior, indicando que mesmo áreas com maior cobertura vegetal começam a apresentar maior resposta hidrológica sob o novo regime de chuvas intensificadas.

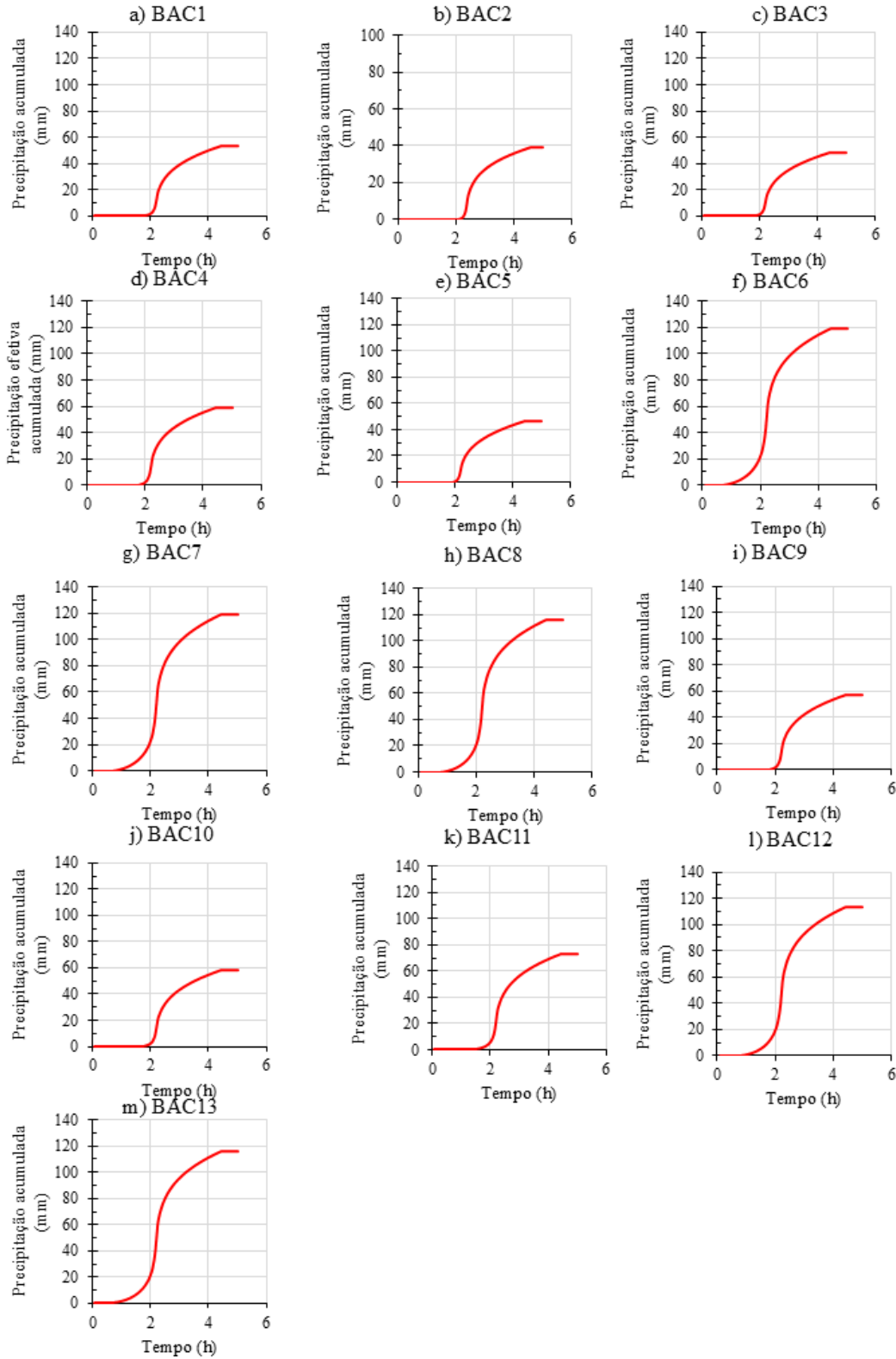
Já as sub-bacias BAC9, BAC10 e BAC11 ocupam uma posição intermediária, com volumes totais de precipitação mais contidos, mas com excedente crescente, principalmente nos períodos de maior intensidade do evento. Esses dados mostram uma tendência de agravamento nas condições de escoamento superficial em toda a bacia, mesmo nas unidades menos críticas, evidenciando o impacto direto das mudanças climáticas sobre o comportamento hidrológico da bacia do rio Morno.

Os totais acumulados para o evento de mudanças climáticas podem ser conferidos na Figura 17. Os gráficos de precipitação excedente acumulada para o evento gerado com base na curva IDF modificada para cenários de mudanças climáticas evidenciam um aumento significativo nos volumes máximos acumulados em todas as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Morno. As sub-bacias BAC6, BAC7, BAC8, BAC12 e BAC13 se destacam por apresentarem os maiores valores acumulados, todos acima de 100 mm. Esse comportamento reforça a elevada conversão da chuva em escoamento superficial nessas áreas.

As demais sub-bacias, BAC1, BAC2, BAC3, BAC4, BAC5, BAC9, BAC10 e BAC11, apresentaram valores acumulados em torno de 60 mm, com resposta hidrológica menos intensa. Embora os volumes sejam inferiores aos observados nas bacias críticas, ainda representam um acréscimo significativo em relação ao cenário anterior, indicando que mesmo áreas com maior cobertura vegetal e menor urbanização passam a registrar maiores excedentes sob o novo regime de chuvas intensificadas. Esse padrão generalizado de aumento nos acumulados

confirma a sensibilidade da bacia do rio Morno às mudanças no regime pluviométrico e destaca a necessidade de revisão das estratégias de manejo e controle do escoamento superficial frente aos cenários climáticos futuros.

Figura 17- Acumulado de chuva excedente para regime de chuvas levando em consideração as mudanças climáticas.



Fonte: Autor, 2025.

- Coeficientes de escoamento para os eventos modelados

Os Coeficientes de Escoamento (Ce) estimados para os eventos modelados podem ser conferidos na Tabela 7.

Tabela 7- Coeficientes de escoamento para eventos de chuva de projeto modelados

Bacia	Ce (PDDR)	Ce (Mudanças climáticas)
BAC1	0.28	0.36
BAC2	0.32	0.39
BAC3	0.25	0.32
BAC4	0.33	0.40
BAC5	0.24	0.31
BAC6	0.76	0.80
BAC7	0.76	0.80
BAC8	0.74	0.78
BAC9	0.31	0.39
BAC10	0.32	0.39
BAC11	0.42	0.49
BAC12	0.72	0.77
BAC13	0.74	0.78

Fonte: Autor, 2025.

A análise comparativa dos coeficientes de escoamento superficial (Ce) calculados para os dois eventos de chuva revela um aumento sistemático dos valores de Ce em todas as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Morno. Este comportamento está associado ao aumento da intensidade do evento de projeto, uma vez que, para uma mesma área e condições de uso do solo, eventos de maior magnitude tendem a gerar proporcionalmente maior escoamento superficial. Assim, a intensificação da chuva excedente decorrente das mudanças climáticas, refletida na atualização das equações IDF, resultou no aumento do Ce, implicando em impactos hidrológicos significativos.

As sub-bacias BAC1, BAC2, BAC3, BAC4, BAC5, BAC9 e BAC10, que apresentavam coeficientes mais baixos no cenário PDDR (entre 0,24 e 0,33), tiveram aumentos médios de aproximadamente 0,07 pontos no Ce, alcançando valores entre 0,31 e 0,40 no cenário de mudanças climáticas.

Nas sub-bacias BAC6, BAC7, BAC8, BAC12 e BAC13, que já apresentavam coeficientes elevados no evento PDDR (entre 0,72 e 0,76), os valores de Ce também aumentaram, atingindo até 0,80 em BAC6 e BAC7. Embora os acréscimos absolutos tenham sido menores (cerca de 0,04 pontos), o patamar já elevado dos coeficientes reforça a baixa

capacidade de infiltração dessas unidades e sua alta sensibilidade à intensificação dos eventos extremos.

A sub-bacia BAC11 apresentou um comportamento intermediário, com C_e passando de 0,42 para 0,49, situando-se entre as áreas de maior e menor retenção. De forma geral, os dados indicam uma elevação consistente da relação entre escoamento e precipitação total em todas as sub-bacias, confirmando que, sob o efeito das mudanças climáticas, a resposta hidrológica da bacia tende a gerar volumes crescentes de escoamento superficial, independentemente das características locais de uso e ocupação do solo. Esses resultados destacam a importância de considerar cenários futuros nas análises de drenagem e no dimensionamento de infraestruturas hidráulicas.

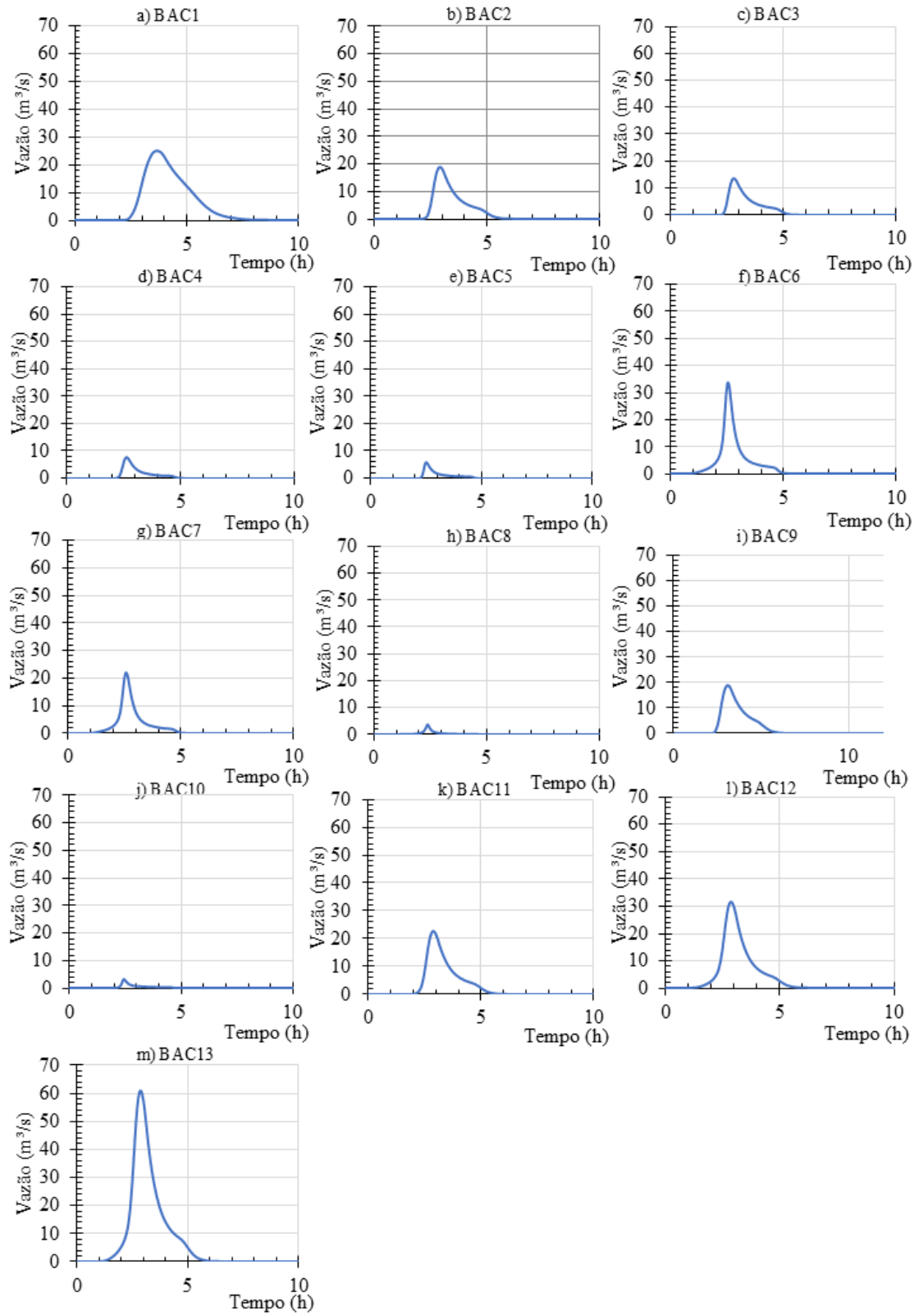
Esse comportamento observado está em consonância com as projeções de Zákha et al. (2021), que apontam para uma intensificação nos processos do ciclo hidrológico nas bacias brasileiras sob influência das mudanças climáticas, com destaque para o aumento da aridez e da concentração das chuvas em eventos mais curtos e intensos. Esse novo regime pluviométrico acarreta uma maior proporção de precipitação convertida diretamente em escoamento superficial, reduzindo o tempo de resposta das bacias e elevando a pressão sobre os sistemas de drenagem. Tal constatação reforça a necessidade de que estudos hidrológicos, especialmente aqueles voltados para áreas urbanas ou em processo de expansão, incorporem cenários climáticos futuros em suas análises, a fim de garantir maior robustez na previsão de vazões de pico e na mitigação de riscos associados ao aumento do escoamento superficial.

5.2 Hidrogramas discretizados por sub bacia

As Figuras 18 e 19 contém as vazões de escoamento de cada sub-bacia, considerando os cenários de regime de chuva atual e de mudanças climáticas, respectivamente.

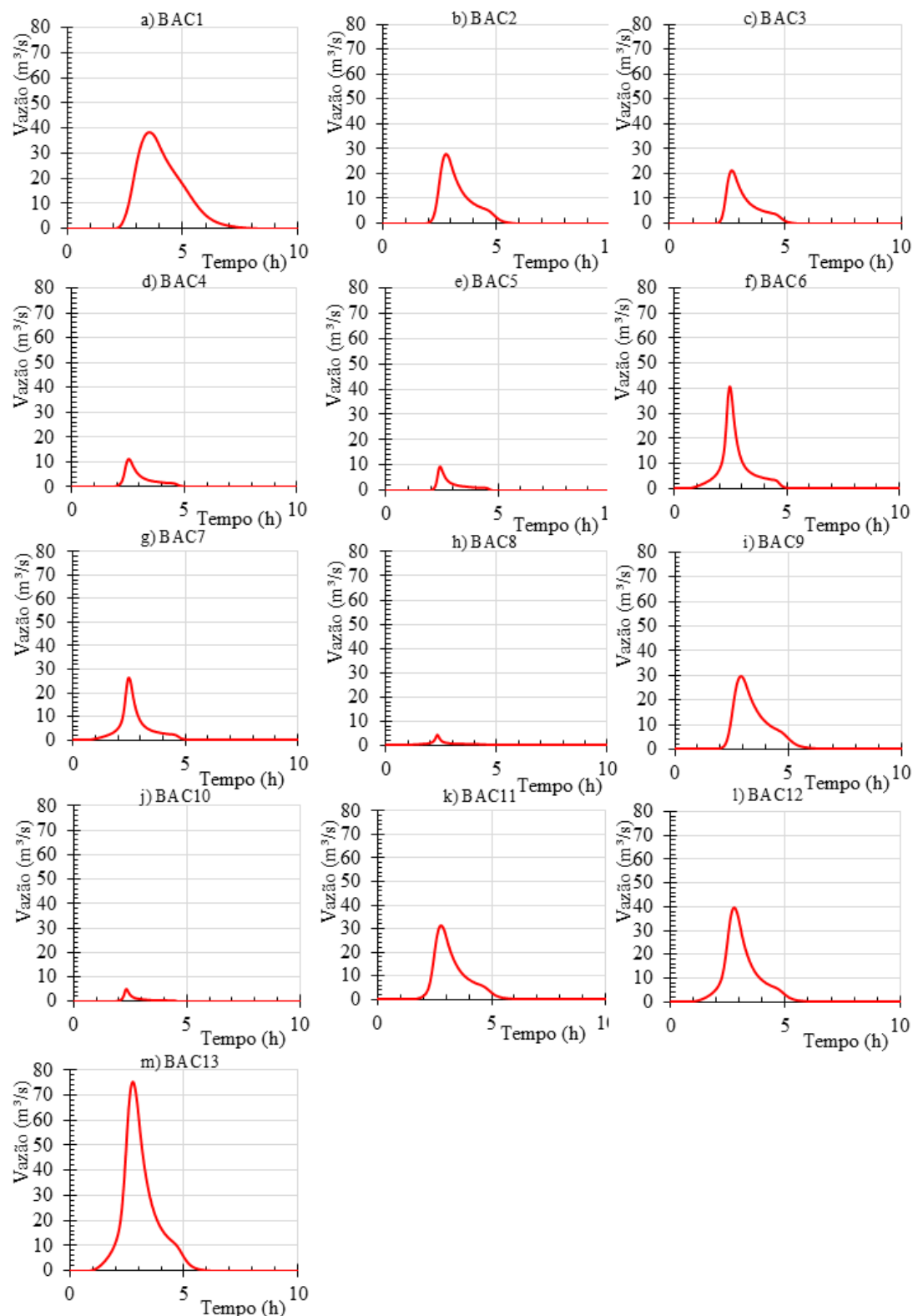
A comparação entre os hidrogramas simulados para os dois cenários de precipitação evidencia o impacto direto do aumento da intensidade pluviométrica na geração de vazões nas sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Morno. Em todas as sub-bacias, a adoção da curva IDF ajustada para mudanças climáticas resultou em picos de vazão mais elevados e hidrogramas com respostas mais rápidas e concentradas.

Figura 18- Hidrogramas incrementais por sub-bacia para evento modelado a partir do PDDR.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 19- Hidrogramas incrementais por sub-bacia para evento modelado levando em consideração as mudanças climáticas.



Fonte: Autor, 2025.

As sub-bacias BAC6, BAC7, BAC8, BAC12 e BAC13, que anteriormente já apresentavam elevado volume de precipitação excedente e altos coeficientes de escoamento,

foram também as que apresentaram os maiores aumentos nos picos de vazão sob o cenário climático modificado. A BAC13, por exemplo, evidencia um pico de vazão acima de 60 m³/s no cenário climático, enquanto no cenário PDDR esse valor era próximo de 50 m³/s.

Sub-bacias com menor tendência à geração de escoamento superficial, como BAC1, BAC2, BAC3, BAC4 e BAC5, também apresentaram aumento dos picos de vazão, ainda que em menor magnitude. Nessas bacias, o hidrograma do cenário climático não só apresenta picos mais altos como também antecipa o tempo de resposta. Esse comportamento reforça a vulnerabilidade crescente até mesmo das áreas com maior cobertura vegetal diante das alterações climáticas.

Bacias intermediárias como BAC9, BAC10 e BAC11 seguiram a mesma tendência, com elevação moderada das vazões máximas e ligeiro encurtamento na duração dos eventos. A BAC11, por exemplo, passou de um próximo a 20 m³/s para um pico maior que 30 m³/s, o que representa um aumento significativo em termos de risco de extravasamento em áreas urbanizadas.

De forma geral, os hidrogramas revelam um encurtamento da base e acentuação do pico de vazão no cenário de mudanças climáticas, o que implica maior concentração de energia erosiva em menor tempo, aumento da pressão sobre canais e sistemas de drenagem e ampliação do risco de inundações. Esses resultados estão em total consonância com os dados de precipitação excedente e coeficientes de escoamento previamente analisados, reafirmando a importância da incorporação de cenários climáticos futuros no planejamento e dimensionamento de infraestrutura hidráulica na bacia do rio Morno. Dados mais detalhados estão evidenciado na Tabela 8.

Nota-se que todas as sub-bacias da área de estudo apresentaram um aumento percentual expressivo de vazão de pico (Q_p) quando submetidas ao regime de chuvas considerando as mudanças climáticas, com variações que vão de 19,44% (BAC8) a 55,56% (BAC3).

Apesar da manutenção da duração total do evento, os dados indicam uma redução do T_p em todas as sub-bacias, com variações entre 1773% e 4,33%, revelando que a resposta hidrológica das bacias se tornou mais rápida. Essa antecipação do pico hidrológico pode estar relacionada à diminuição da capacidade de armazenamento inicial do solo frente a chuvas mais intensas, o que reduz o tempo necessário para que a bacia atinja sua vazão máxima. Dessa forma, os resultados reforçam a hipótese de que os eventos extremos associados às mudanças climáticas não apenas aumentam o volume de escoamento, como também reduzem o tempo disponível para a resposta operacional de sistemas de drenagem e controle de cheias.

Tabela 8- Vazão e tempo de pico de hidrogramas de projeto considerando IDF do regime de chuvas atual, recomendada pelo PDDR (2016) e regime de chuva modificado, ajustado para considerar mudanças climáticas pela nova curva IDF (Rodrigues et al., 2024)

Regime de chuvas atual			Regime de chuva considerando as mudanças climáticas			
	Qp (m³/s)	Tp (h)	Qp(m³/s)	Tp (h)	Percentual de crescimento da Qp (%)	Percentual de redução do Tp (%)
BAC1	25,20	3,65	38,40	3,58	52,38	1.92%
BAC2	19,00	2,85	28,00	2,78	47,37	2.46%
BAC3	13,50	2,77	21,00	2,65	55,56	4.33%
BAC4	7,60	2,60	11,00	2,50	44,74	3.85%
BAC5	6,00	2,48	9,30	2,40	55,00	3.23%
BAC6	33,70	2,52	40,60	2,43	20,47	3.57%
BAC7	21,80	2,53	26,30	2,47	20,64	2.37%
BAC8	3,60	2,38	4,30	2,30	19,44	3.36%
BAC9	19,10	3,08	29,40	2,93	53,93	4.87%
BAC10	3,40	2,40	4,90	2,32	44,12	3.33%
BAC11	22,60	2,85	31,30	2,78	38,50	2.46%
BAC12	31,70	2,82	39,40	2,77	24,29	1.77%
BAC13	60,80	2,83	75,20	2,77	23,68	2.12%

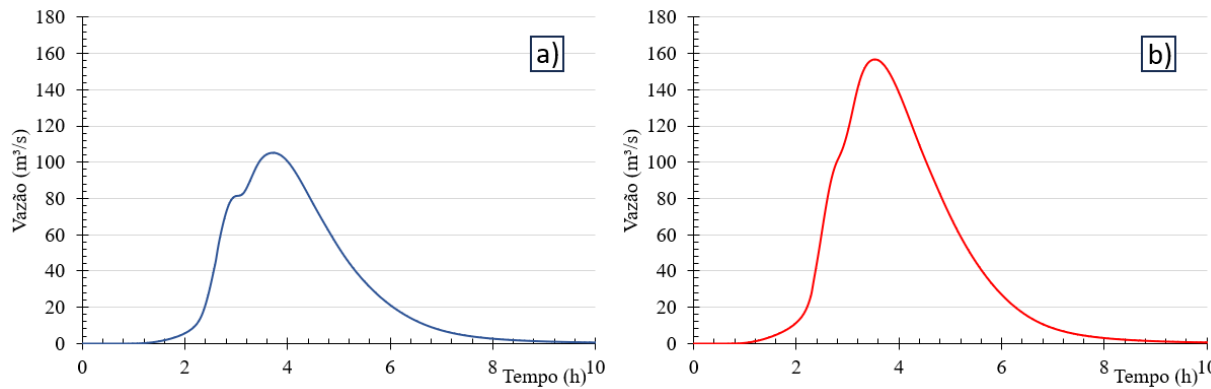
Fonte: Autor, 2025.

Observa-se que, para o cenário de chuvas intensificadas pelas mudanças climáticas, as sub-bacias com maior cobertura vegetal apresentaram aumento percentual mais expressivo nos picos de vazão em comparação às sub-bacias mais urbanizadas. Essa diferença está relacionada à capacidade de amortecimento hidrológico característica das áreas florestadas, que, sob eventos de menor intensidade, retêm parte significativa da precipitação e reduzem substancialmente os volumes escoados. Contudo, diante de um evento mais intenso, como o modelado pela curva IDF ajustada, essa capacidade de retenção é superada mais rapidamente, resultando em um aumento proporcional mais elevado no pico de vazão. Em contrapartida, as sub-bacias com maior grau de urbanização, que já apresentavam elevado escoamento superficial no cenário atual, tendem a manter altos valores absolutos de Qp, mas com variação percentual menor, justamente porque o solo já saturado e impermeabilizado oferece pouca variação de resposta entre os cenários. Isso evidencia que o impacto das mudanças climáticas pode ser ainda mais significativo em áreas vegetadas, que, apesar de serem mais resilientes sob condições normais, tornam-se mais sensíveis à intensificação dos eventos extremos.

5.3 Hidrogramas de projeto

Os hidrogramas simulados para a bacia do rio Morno, utilizando o modelo chuva-vazão para os dois cenários distintos de precipitação, com base nas duas curvas IDF, estão expostos na Figura 20.

Figura 20- Hidrogramas estimados para a bacia hidrográfica do Rio Morno, referente a um evento de 25 anos de tempo de retorno: a) chuva de projeto do PDDR e b) IDF mudanças climáticas



Fonte: Autor, 2025.

A Figura 20-a) refere-se à simulação gerada a partir da chuva de projeto recomendada pelo PDDR (2016), enquanto a Figura 20-b) corresponde à chuva de projeto modificada, ajustada para considerar possíveis alterações associadas às mudanças climáticas, incorporadas pela proposição de uma nova curva IDF (Rodrigues et al., 2024).

Ambas as simulações resultaram em eventos concentrados e de curta duração, entretanto é possível observar diferenças marcantes na magnitude das vazões de pico. O hidrograma das mudanças climáticas (Figura 20-b) resultou em uma vazão máxima superior a 150 m³/s, com subida abrupta e declínio acentuado, caracterizando uma resposta mais intensa e concentrada no tempo. Houve um crescimento de 48.91% em relação a vazão máxima obtida pelo regime de chuvas atuais (Figura 20-a). Esse comportamento evidencia o aumento potencial da severidade dos eventos hidrológicos extremos em cenários futuros de clima alterado.

O hidrograma resultante da chuva concebida a partir do PDDR (Figura 10-a) apresentou um pico de vazão mais atenuado, com valor próximo a 105 m³/s e com um leve platô na ascensão da curva, sugerindo maior capacidade de infiltração ou amortecimento da bacia para esse cenário. A diferença entre os dois hidrogramas (Tabela 9) demonstra a sensibilidade da bacia às alterações nos padrões de precipitação.

Tabela 9- Valores estimados de vazão de pico e tempo de pico para dois cenários de chuva de

	Vazão de pico (m³/s)	Tempo de pico (h:min)
Chuva pela IDF PDDR	105,26	3:43
Chuva pela IDF Rodrigues et al., 2024	156,75	3:32

Fonte: Autor, 2025.

É possível inferir que o tempo de pico apresenta uma leve antecipação no cenário de chuva de projeto modificado, calculado com base na IDF de Rodrigues et al., em relação à IDF oficial do PDDR. Essa diferença temporal, ainda que pequena, indica uma resposta mais rápida da bacia frente ao segundo cenário, o que pode comprometer a eficácia de estruturas de controle ou atrasar ações de mitigação, caso não se considere essa antecipação na etapa de planejamento urbano e de drenagem.

Considerando estudos recentes que apontam para o aumento da intensidade e frequência dos eventos hidrológicos extremos (Kreibich et al., 2022), torna-se evidente a necessidade de reavaliação dos critérios tradicionais de projeto hidráulico, especialmente no que se refere às curvas IDF utilizadas para simulações chuva-vazão. A discrepância entre os hidrogramas gerados a partir da IDF oficial e da IDF ajustada ao cenário de mudanças climáticas indica não apenas uma maior magnitude de vazão de pico, mas também uma antecipação do tempo de resposta da bacia, o que pode comprometer a eficiência de estruturas de controle existentes. Esse comportamento reforça a importância de incorporar projeções climáticas em planejamentos futuros (Zákhia et al., 2021), adaptando os sistemas urbanos de drenagem para garantir maior resiliência frente a eventos concentrados e intensos.

5.4 Manchas de inundação

- Regime de chuvas atuais

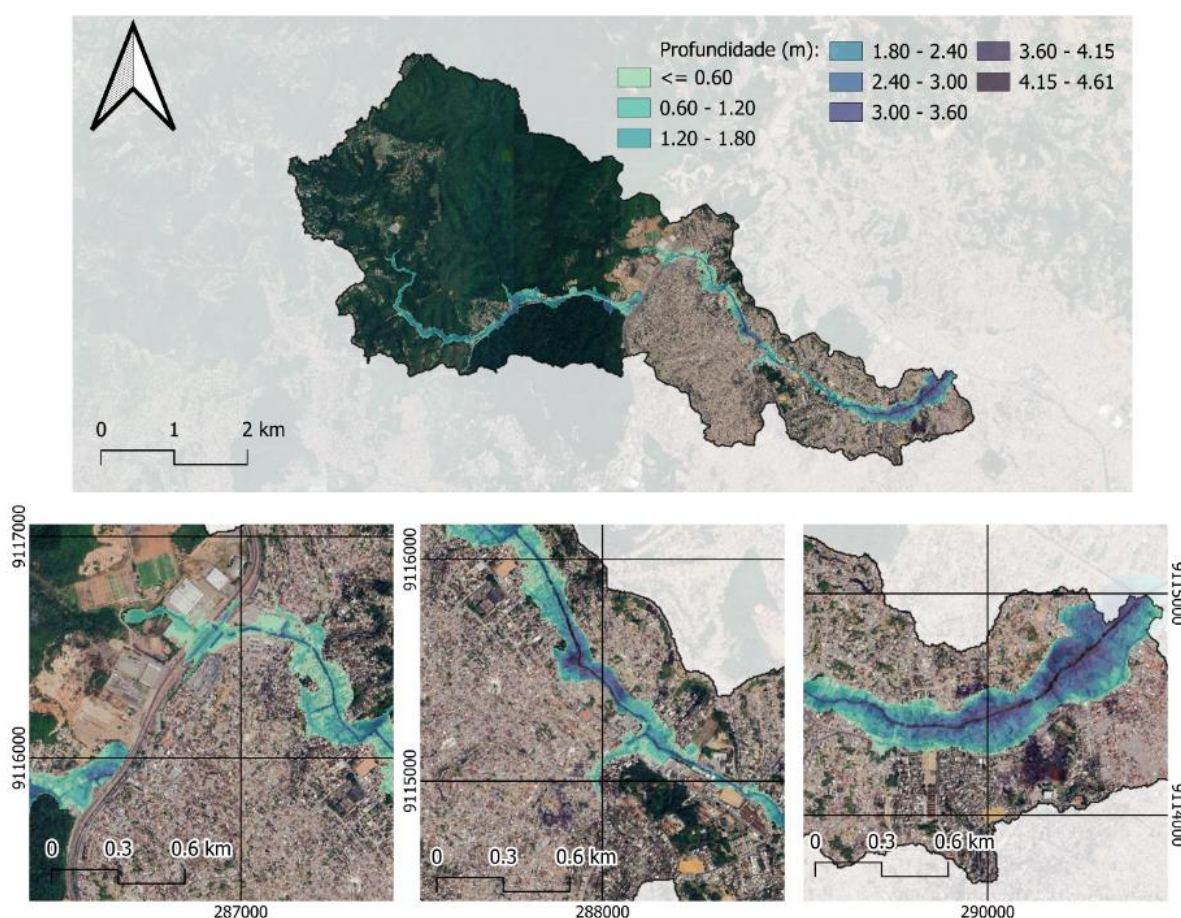
A mancha de inundação representa a delimitação espacial das áreas sujeitas a ficarem submersas durante um evento hidrológico extremo. A mancha de inundação para o evento modelado considerando o regime de chuvas atual, apresentou uma área molhada total de 128,016 hectares e profundidade média de 1,51 metros (Figura 21).

Segundo critérios técnicos, essa profundidade já é suficiente para classificar a inundação como severa (profundidade > 1,5 m). Embora a profundidade máxima registrada tenha atingido 5,20 metros, esse valor está associado exclusivamente ao leito do rio principal, representando risco direto reduzido às áreas urbanizadas, e por isso deve ser analisado com cautela para evitar enviesamento nos resultados. Por outro lado, a presença de zonas com profundidade abaixo de 0,60 m indica a existência de áreas periféricas da mancha, onde o alagamento é superficial, mas ainda pode causar prejuízos à mobilidade urbana e à infraestrutura local. Além disso, mesmo nessas áreas de alagamento superficial, a água proveniente do rio principal tende a ser insalubre, caracterizada por águas cinzentas devido ao elevado teor de matéria orgânica e à presença de

resíduos sólidos (Ferreira et al., 2021). A dispersão dessa água contaminada durante as enchentes eleva o risco sanitário nas zonas urbanas, favorecendo a proliferação de doenças de veiculação hídrica e o aumento populacional de vetores, agravando os impactos à saúde pública e às condições de habitabilidade nas regiões afetadas.

A predominância de profundidades elevadas na média geral reforça o grau de severidade do evento e destaca a vulnerabilidade das áreas urbanas da bacia frente a eventos extremos, mesmo sob o regime de precipitação atual.

Figura 21- Mancha de inundação para regime de chuvas atual



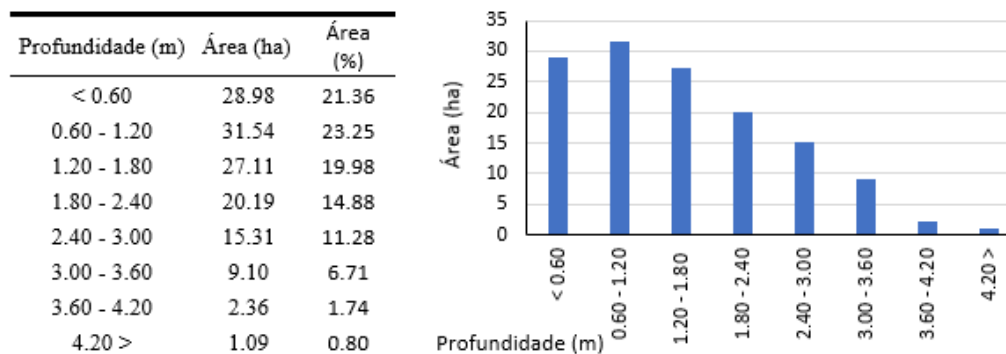
Fonte: Autor, 2025.

A distribuição espacial discretizada em classes de área da mancha de inundação para regime de chuvas atuais está exposta na Figura 22.

A partir da análise da Figura 22, observa-se que a maior parte da área inundada está concentrada nas faixas de profundidade entre 0,60 e 1,20 metros (31,54 ha) e inferior a 0,60 metros (28,98 ha), totalizando aproximadamente 60 hectares. Esse predomínio de áreas com lâminas d'água mais rasas indica que grande parte da inundação ocorre em zonas de menor

acúmulo vertical, o que, a depender da velocidade do escoamento, pode representar desde condições seguras até níveis relevantes de risco hidrodinâmico.

Figura 22- Detalhamento de área ocupada por cada classe de profundidade.



Fonte: Autor, 2025.

As faixas subsequentes, como 1,20 –1,80 m (27,11 ha) e 1,80–2,40 m (20,19 ha), também abrangem extensões expressivas da mancha, sugerindo que há segmentos da bacia com acúmulo hídrico significativo, possivelmente associados à proximidade com o leito principal do rio ou à topografia rebaixada. As áreas com profundidades superiores a 2,40 m são progressivamente menos representativas: 15,31 ha para a faixa de 2,40 –3,00 m, decrescendo até 1,09 ha na classe acima de 4,20 m.

Essa distribuição permite compreender que, embora as maiores profundidades correspondam a porções restritas do território inundado, elas podem representar zonas críticas da mancha, principalmente quando associadas a velocidades elevadas do escoamento. Por outro lado, a predominância de lâminas d’água rasas não elimina o risco, já que mesmo profundidades reduzidas podem se tornar perigosas sob determinadas condições de velocidade

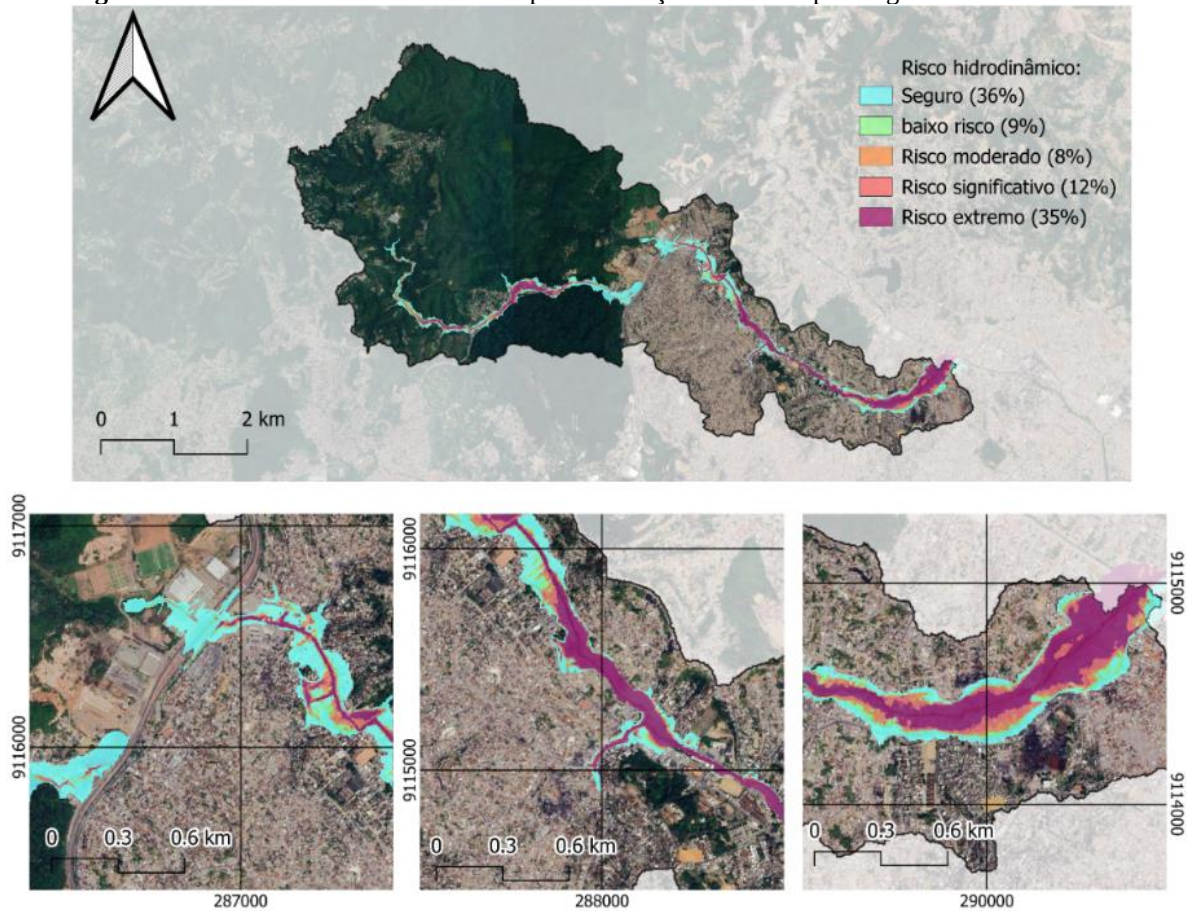
- Risco hidrodinâmico para o regime de chuvas atual

A mancha de inundação de acordo com os níveis de risco hidrodinâmico, definidos com base no produto entre profundidade e velocidade do escoamento está exposta na Figura 23. Foi considerado apenas o grau de classificação de risco proposto para pessoas adultas.

Observa-se que mais da metade da mancha de inundação (55%) foi classificada entre as categorias de risco moderado e extremo, evidenciando a severidade do evento mesmo sob o regime de chuvas atual.

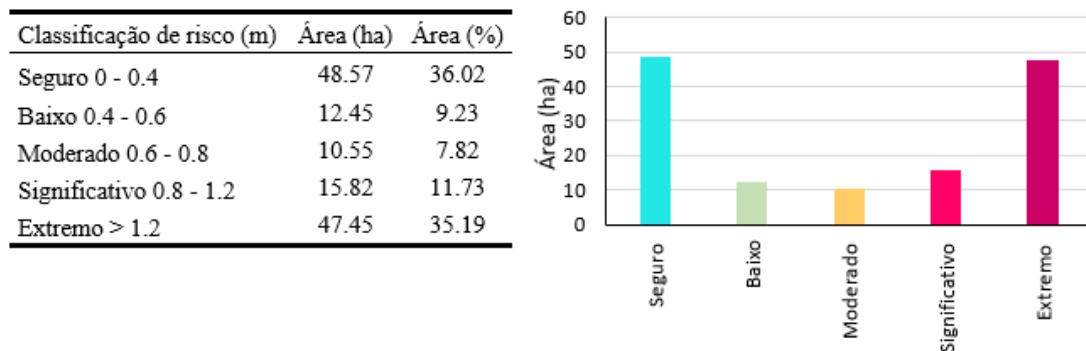
Pode-se conferir o quanto de área foi ocupado por cada classe de risco hidrodinâmico a partir da análise da Figura 24.

Figura 23- Risco hidrodinâmico estimado para inundação concebida pelo regime de chuvas atual



Fonte: Autor, 2025.

Figura 24- Subdivisão da área exposta ao risco hidrodinâmico para regime de chuvas atual.



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos dados apresentados na Figura 24 mostra que a maior área inundada foi classificada na categoria seguro, com aproximadamente 48,57 ha (36,02%). Em seguida, destaca-se a classe de risco extremo, que abrange 47,45 ha (35,19%), valor muito próximo ao da classe segura. As classes intermediárias apresentam áreas significativamente menores: baixo

risco com 12,45 ha (9,23%), risco significativo com 15,82 ha (11,73%) e risco moderado com 10,55 ha (7,82%).

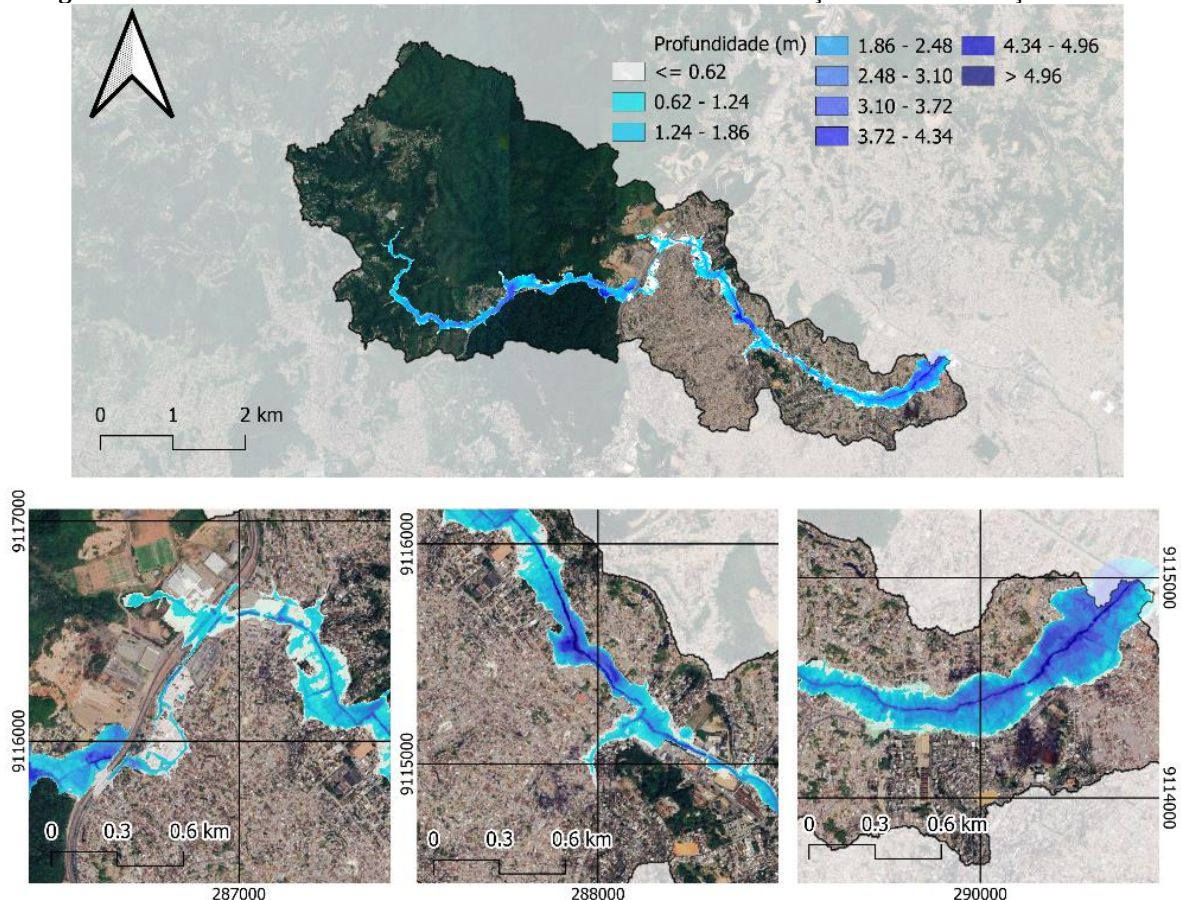
Essa distribuição demonstra que, no cenário de mudanças climáticas, grande parte da mancha de inundação concentra-se nas duas extremidades da escala de risco, com áreas expressivas tanto sob condição segura quanto sob risco extremo. As demais categorias ocupam parcelas menores da mancha total, variando entre aproximadamente 10 e 16 ha (25,78%).

A leitura conjunta desses valores permite identificar a magnitude das áreas expostas a diferentes intensidades de risco hidrodinâmico, o que é fundamental para o mapeamento e priorização de medidas de gestão e controle em áreas inundáveis. Essa distribuição ressalta a necessidade de atenção às áreas urbanas mais expostas, uma vez que valores elevados de DV representam alto potencial de danos materiais e riscos à segurança da população.

- Manchas de inundação levando em consideração as mudanças climáticas

A mancha de inundação estimada para um evento levando em consideração as mudanças climáticas podem ser conferidas na Figura 25.

Figura 25- Profundidade estimada levando em consideração as mudanças climáticas.

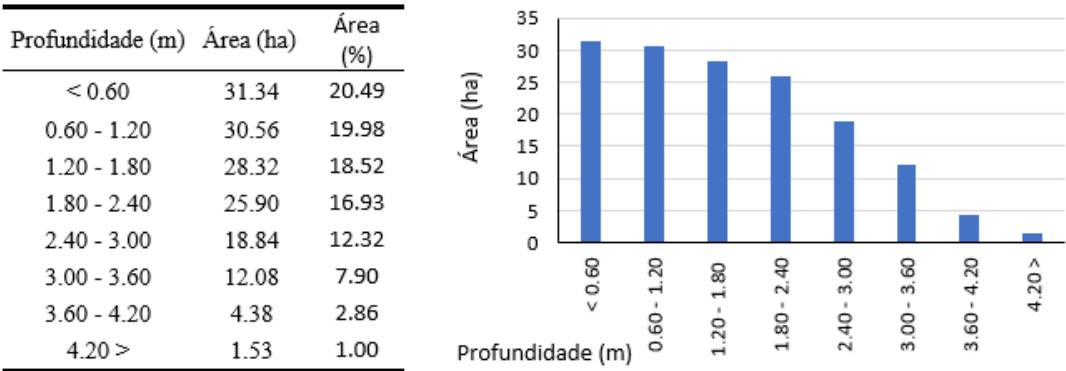


Fonte: Autor, 2025.

Sob o cenário de mudanças climáticas, a mancha de inundação apresentou uma expansão espacial de aproximadamente 13%, totalizando 144.349 hectares de área submersa. A profundidade média estimada foi de 1,615 metros, valor que evidencia a predominância de pontos de inundação com elevada severidade ao longo da área impactada. A profundidade máxima, de 5,58 metros, concentrou-se no canal principal da bacia, refletindo a dinâmica natural de acúmulo nas seções mais profundas do leito.

De acordo com parâmetros de profundidade para o cenário de mudanças climáticas (Figura 26), há uma distribuição relativamente equilibrada das áreas alagadas nas primeiras quatro faixas de profundidade, todas superiores a 25 hectares: < 0,60 m (31,34 ha), 0,60–1,20 m (30,56 ha), 1,20–1,80 m (28,32 ha) e 1,80–2,40 m (25,90 ha). Essa concentração nas faixas de até 2,40 metros indica uma predominância de áreas com profundidade intermediária, sugerindo uma ampliação do volume acumulado de água em relação ao cenário anterior.

Figura 26- Distribuição de profundidade x área para regime de chuvas com mudanças climáticas



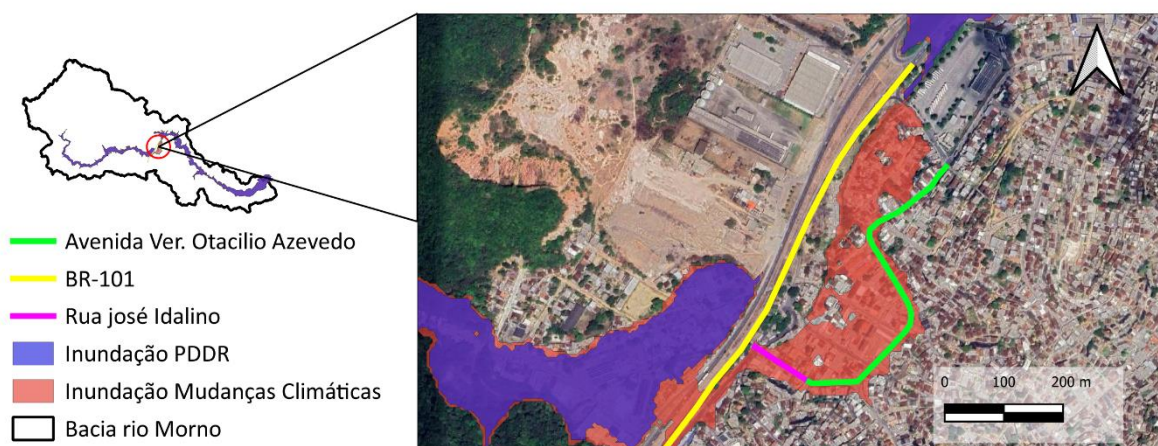
Fonte: Autor, 2025.

Em comparação com a mancha concebida pelo PDDR, nota-se que, embora as faixas de menor profundidade (< 1,20 m) ainda representem uma parcela expressiva da área total, há um ligeiro aumento absoluto das áreas nas faixas de maior profundidade, especialmente entre 2,40–3,00 m (18,84 ha) e 3,00–3,60 m (12,08 ha). Isso indica que, sob o novo regime de precipitação, a mancha não apenas se expande lateralmente, mas também apresenta um aprofundamento generalizado em vários trechos, contribuindo para o aumento do risco hidrodinâmico. As classes superiores a 3,60 m continuam representando parcelas reduzidas da mancha total (4,38 ha para 3,60–4,20 m e 1,53 ha para > 4,20 m), porém com valores discretamente maiores do que os observados no cenário do PDDR. Essa alteração reforça o comportamento mais severo do evento, com maior volume de água acumulado nas seções mais profundas do leito e nos setores urbanos mais adensados.

Portanto, a partir dessa distribuição espacial, é possível inferir que o evento gerado sob o cenário de mudanças climáticas resultou em um aumento da extensão das áreas inundadas, com maior concentração de lâminas d'água acima de 1,20 m, o que pode potencializar os impactos sobre estruturas físicas, mobilidade urbana e segurança da população exposta.

Não houve grande discrepância entre a delimitação espacial das manchas de inundação simuladas, entretanto, destaca-se a ocorrência de inundação na Rua Córrego José Idalino e na Avenida Vereador Otacílio Azevedo ($7^{\circ}59'38.14''\text{S}$; $34^{\circ}56'9.77''\text{W}$) exclusivamente na simulação associada ao cenário de mudanças climáticas (Figura 27). Nessa mesma região, a simulação com base na IDF convencional não indicou ocorrência de inundação. Uma possível explicação para essa diferença pode estar relacionada à presença de um bueiro localizado no ponto de interseção entre o rio principal e a rodovia BR-101 ($7^{\circ}59'40.71''\text{S}$; $34^{\circ}56'19.70''\text{W}$), cuja falta de sua representação no modelo hidrodinâmico pode ter criado um efeito de barramento artificial. Esse comportamento teria limitado a passagem do escoamento na simulação com a IDF padrão, no entanto, sob o cenário com chuvas mais intensas, o volume excedente teria superado essa obstrução, provocando o transbordamento e resultando na mancha de inundação observada. Não foram encontradas informações específicas sobre a estrutura hidráulica responsável pela passagem do fluxo nesse ponto do PDDR.

Figura 27- Comparativo do barramento artificial ocasionado pela BR-101.



Fonte: Autor, 2025.

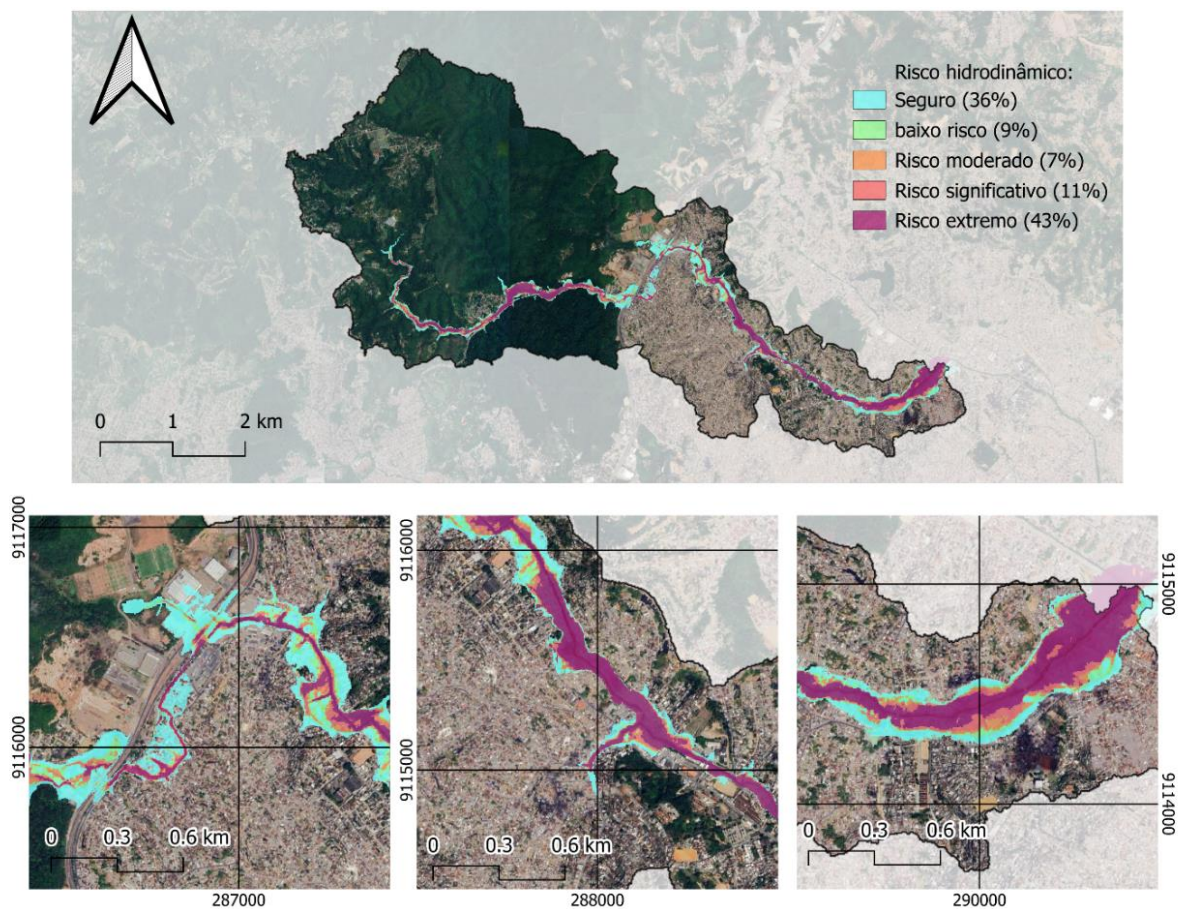
Embora a variação espacial da mancha de inundação entre os dois cenários tenha sido relativamente pequena, totalizando aproximadamente 13%, os resultados sugerem diferenças mais expressivas em relação à profundidade das inundações. Esse comportamento está em consonância com Kreibich et al. (2022), que destacam a tendência de intensificação dos eventos hidrológicos extremos e o consequente aumento da severidade das inundações, mesmo em

situações onde a expansão da área afetada é limitada. Além disso, Mendes (2022) demonstra que, em ambientes urbanos, pequenas variações no volume precipitado ou na capacidade de escoamento podem provocar elevações significativas nos níveis d'água, especialmente em regiões com infraestrutura insuficiente ou condicionantes topográficos adversos. No presente estudo, a ocorrência de alagamentos localizados apenas no cenário com mudanças climáticas, em áreas que permaneceram secas na simulação convencional, pode estar associada à interação entre elementos urbanos e a modelagem hidrodinâmica, como a representação de estruturas de drenagem que, em determinados contextos, podem influenciar o comportamento do fluxo. Tais resultados reforçam a importância de considerar não apenas a extensão das manchas, mas também as variações na profundidade ao avaliar os riscos hidrológicos em cenários futuros.

- Risco hidrodinâmico para evento levando em consideração as mudanças climáticas

Os parâmetros de risco hidrodinâmico para o evento de projeto levando em considerações as mudanças climáticas podem ser observados na Figura 28.

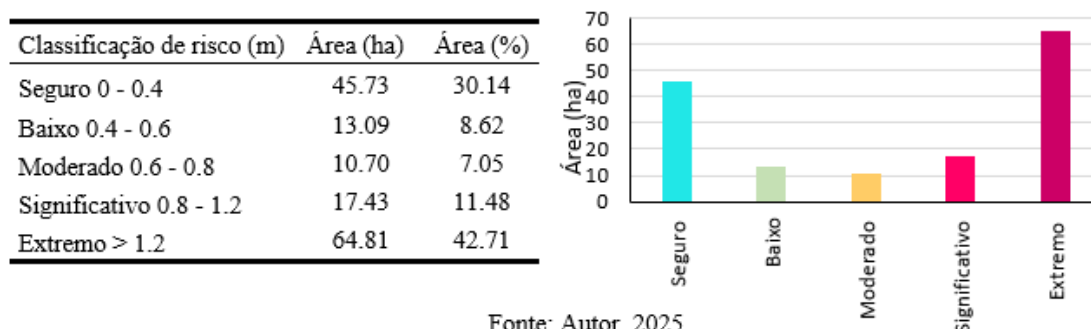
Figura 28- Risco hidrodinâmico estimado para inundação levando em consideração as mudanças climáticas.



Fonte: Autor, 2025.

Nesse cenário, 61% da inundação foi classificada entre as categorias de risco moderado e extremo, com um destaque para a categoria mais severa, que aumentou de 35% para 43% de toda área inundada (Figura 29).

Figura 29- Subdivisão da área exposta ao risco hidrodinâmico para regime de chuvas considerando as mudanças climáticas



A partir da análise da Figura 29-b, observa-se que no cenário de mudanças climáticas há um aumento expressivo da área classificada como de risco extremo, que totaliza 64,81 hectares, sendo a maior entre todas as classes de risco. Em comparação com o cenário anterior (PDDR), em que essa categoria abrangia aproximadamente 47 hectares, ressalta-se um acréscimo de mais de 17 hectares em zonas críticas, o que evidencia o agravamento das condições de segurança hidrodinâmica sob o novo regime de chuvas.

A classe segura, embora ainda represente uma área extensa (45,73 hectares), apresenta redução em relação ao cenário anterior, no qual totalizava aproximadamente 48,57 hectares. As demais categorias de risco — baixo risco (13,09 ha), risco moderado (10,70 ha) e risco significativo (17,43 ha) — mantêm valores em proporções próximas às observadas no cenário do PDDR, com variações discretas.

Esse deslocamento das áreas entre as categorias de menor risco para a de risco extremo está diretamente associado ao aumento da profundidade e/ou velocidade do escoamento nos trechos críticos da mancha, conforme já identificado na análise da distribuição de profundidades. A ampliação da área em risco extremo representa uma intensificação dos impactos potenciais à população e à infraestrutura, sobretudo em áreas urbanizadas de baixa renda, exigindo revisão das estratégias de mitigação e resposta em situações de emergência.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo apresentou uma avaliação hidrológica e hidrodinâmica da bacia do rio Morno, localizada em área densamente urbanizada do município do Recife, com foco na simulação de eventos extremos de inundação, tanto sob o regime atual de precipitação quanto em cenários futuros considerando mudanças climáticas. Por meio da aplicação integrada dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS, alimentados por dados geoespaciais de alta resolução, foi possível estimar os hidrogramas de projeto e as manchas de inundação resultantes.

Os resultados demonstraram que a bacia apresenta significativa vulnerabilidade, sobretudo nas zonas com alta densidade populacional e condições socioeconômicas mais precárias. A comparação entre os cenários simulados evidenciou aumento expressivo da vazão de pico e da profundidade média de inundação em função do agravamento das condições climáticas, com destaque para a intensificação dos riscos hidrodinâmicos. Tais achados corroboram estudos recentes sobre a crescente severidade dos eventos hidrológicos extremos e reforçam a importância da revisão de parâmetros de projeto hidráulico.

Uma das limitações do trabalho é a ausência de dados observados de vazão na bacia hidrográfica estudada, o que impossibilita a calibração e validação dos modelos. A disponibilidade de dados observados é fundamental para redução de incertezas nos resultados. Esses parâmetros são essenciais para o planejamento urbano, e sua ausência deixa a área descoberta quanto ao planejamento urbano e a gestão hídrica.

Recomenda-se, ainda, o aprofundamento da modelagem com dados de campo como secções transversais do rio, bem como a inclusão de estruturas hidráulicas no modelo hidrodinâmico. Por fim, destaca-se a utilidade da abordagem metodológica adotada como suporte técnico à formulação de políticas públicas de adaptação climática e redução de desastres em centros urbanos vulneráveis.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. C.; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, C. E. S. de.** Caracterização temporal da qualidade da água da Baía de Guanabara com aplicação da modelagem computacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2019.
- CAVALCANTI, C. B.** O Recife e seus bairros. Recife: Câmara Municipal do Recife, 1998.
- DIÁRIO DE PERNAMBUCO.** A enchente de 1975, Tapacurá e Margot Fonteyn. 2021. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/opiniao/2021/06/a-enchente-de-1975-tapacura-e-margot-fonteyn.html>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- DONG, P.; CHEN, Q.** LIDAR remote sensing and applications. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2018.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Argissolos Vermelho-Amarelos. Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-vermelho-amarelos>. Acesso em: 09 abr. 2025.
- FAN, F. M. et al.** Discretização de redes fluviais para modelos hidrológico-hidrodinâmicos de grande escala. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 26, e5, 2021. DOI: [10.1590/2318-0331.262120200070](https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200070).
- FERREIRA, Willian José et al.** Modelagem hidrológica em bacias urbanizadas: o impacto da mudança do uso do solo pelo método CN. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 7, n. 1, p. 741–757, 2025. <https://doi.org/10.56238/arev7n1-044>.
- FERREIRA, A. H. R.; FERREIRA, D. M.; FERNANDES, C. V. S.** Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água em apoio ao enquadramento de corpos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, Porto Alegre, v. 18, e20, 2021.
- FGV – Fundação Getúlio Vargas.** Qual a faixa de renda familiar das classes sociais no Brasil? Disponível em: <https://cps.fgv.br/qual-faixa-de-renda-familiar-das-classes>. Acesso em: 04 dez. 2024.
- G1 PERNAMBUCO.** Chuva forte faz rios transbordarem, água invade casas e deixa moradores ilhados no Recife. 14 jan. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2025/01/14/chuva-forte-faz-rios-transbordarem>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Malhas territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 07 abr. 2025.

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/politicas/snuc.html>. Acesso em: 07 abr. 2025.

KREIBICH, H.; VAN LOON, A. F.; SCHRÖTER, K.; et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature*, Londres, v. 608, p. 80–86, 2022.

MELO, D. de A.; CABRERA, J. M. A.; WENDLAND, E. Estimativa da recarga em diferentes usos agrícolas com base em balanço hídrico e modelagem computacional. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 31–43, 2017.

MENDES, C. A. B.; SOUSA, M. B.; PEREIRA, S. A. S.; SANTOS, K. A.; FORMIGA, K. T. M. Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 141–157, jan./fev. 2022. DOI: 10.1590/S1413-415220221027.

MENDONÇA, L. M. de; GOMIDE, I. de S.; SOUSA, J. V. de; BLANCO, C. J. C. Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, Porto Alegre, v. 18, e2, 2021.

METSUL METEOROLOGIA. O dia em que Recife inundou e meio Brasil congelou. 2022. Disponível em: <https://metsul.com/o-dia-em-que-recife-inundou-e-meio-brasil-congelou/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

NE10. Chuvas no Recife: enchente como a de 1975 pode voltar a acontecer? Relembra a tragédia. 2022. Disponível em: <https://ne10.uol.com.br/noticias/2022/05/15016740-chuvas-no-recife-enchente-como-a-de-1975-pode-voltar-a-acontecer-relembra-a-tragedia.html>. Acesso em: 12 abr. 2025.

PAPAIIOANNOU, G. et al. **An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas.** *Hydrology*, v. 5, n. 2, p. 24, 20 abr. 2018.

PAZ, Adriano Rolim da. Modelos digitais de elevação para estudos ambientais [livro eletrônico]. Porto Alegre, RS: ABRHidro, 2024. PDF.

PAZ, Adriano Rolim da; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 31–43. 2010.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro; COLLISCHONN, Walter. Conservação de volume em modelos simplificados de propagação de vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 83–96, out./dez. 2012.

RODRIGUES, A. B. et al. Atualização das curvas IDF para Recife no cenário de mudanças climáticas até 2100. *Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. João Pessoa: ABRHidro, 2024.

ROLIM, P. A. M.; QUEIROZ, J. C. B.; JESUS, E. S.; OLIVEIRA, L. L. Uso da modelagem hidrológica para calibração de curva-chave de vazão em Rio Amazônico com efeito de remanso. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 5, p. 273–283, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0026>.

SANDERS NETO, A. C. Modelagem computacional do transitório hidráulico em redes de distribuição de água com uso do método lagrangeano das ondas características. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativas da chuva excedente com o método de Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte 1: classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 10, n. 4, 2005.

SCHÖNTAG, J. M.; MUZA, M. N. O impacto das mudanças climáticas nas curvas de intensidade-duração-frequência da precipitação no noroeste do Rio Grande do Sul – Brasil. *Geosul*, Florianópolis, v. 39, n. 89, p. 251-273, jan./abr. 2024.

SILVA, Eliézer Cláudio Ribeiro et al. Modelagem hidrodinâmica como ferramenta para gerenciamento de riscos hídricos no rio Tapajós. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 2, p. 337–350, 2021. DOI: [10.20502/rbg.v22i2.1975](https://doi.org/10.20502/rbg.v22i2.1975)

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 2, p. 9–18, 2012. DOI: 10.21168/rbrh.v17n2.p9-18.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, v. 12, 2020.

TEIXEIRA, R. L. P. planejamento urbano e adaptação climática: entre possibilidades e barreiras nas cidades de natal/rn e curitiba/pr. 2019 Dissertação de mestrado (Estudos urbanos) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019

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

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. M. Urban Flood Management. World Meteorological Organization, p. 303, 2007.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap. 3, p. 71–138.

URBANI, G. L.; GRACIOSA, M. C. P.; VALVERDE, M. C. Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, Porto Alegre, v. 20, e13, 2023.

ZÁKHIA, E. M. S. et al. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 4, p. 667–681, out. 2021.