



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**THAÍS BARBOSA TELES**

**AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES EM MICROBACIAS URBANAS UTILIZANDO  
MODELAGEM HIDRODINÂMICA HEC-RAS: UM ESTUDO DE CASO NO RIO  
BODOCONGÓ, CAMPINA GRANDE, PB**

**CAMPINA GRANDE – PB  
2025**

THAÍS BARBOSA TELES

**AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES EM MICROBACIAS URBANAS UTILIZANDO  
MODELAGEM HIDRODINÂMICA HEC-RAS: UM ESTUDO DE CASO NO RIO  
BODOCONGÓ, CAMPINA GRANDE, PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**Área de concentração:** Drenagem Urbana

**Orientadora:** Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento

**CAMPINA GRANDE – PB  
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

T269a Teles, Thais Barbosa.

Avaliação de inundações em microbacias urbanas utilizando modelagem hidrodinâmica HEC-RAS [manuscrito] : um estudo de caso no rio bodocongó, Campina Grande - PB / Thais Barbosa Teles. - 2025.  
61 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dra. Ruth Silveira do Nascimento, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

1. Inundações urbanas. 2. Sistema de informação geográfica. 3. Modelagem hidrodinâmica. 4. HEC-RAS. I. Título  
21. ed. CDD 628

THAIS BARBOSA TELES

AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES EM MICROBACIAS URBANAS UTILIZANDO  
MODELAGEM HIDRODINÂMICA HEC-RAS: UM ESTUDO DE CASO NO RIO  
BODOCONGÓ, CAMPINA GRANDE - PB

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Engenharia Sanitária e Ambiental da  
Universidade Estadual da Paraíba,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharela em Engenharia  
Sanitária e Ambiental

Aprovada em: 12/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ruth Silveira do Nascimento** (\*\*\*.217.384-\*\*), em **26/06/2025 21:33:21** com chave **545c4af452ee11f099dd1a7cc27eb1f9**.
- **Marcia Ramos Luiz** (\*\*\*.975.784-\*\*), em **27/06/2025 07:50:21** com chave **85a802a0534411f0a54006adb0a3afce**.
- **Daniel Epifanio Bezerra** (\*\*\*.665.154-\*\*), em **26/06/2025 21:35:15** com chave **983dbe8852ee11f092c71a7cc27eb1f9**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Folha de Aprovação do Projeto Final

**Data da Emissão:** 27/06/2025

**Código de Autenticação:** 939d8e



A Deus, aos meus pais e irmãos pela  
dedicação, companheirismo e amizade,  
DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder forças para enfrentar um caminho tão árduo. Foram muitos os desafios encontrados, mas, com sua presença, permaneci firme e consegui vencer mais uma importante jornada da minha vida.

Aos meus pais, Honório Teles e Josefa da Guia, minha eterna gratidão. Obrigada pelo amor incondicional, pela dádiva da vida, pelo apoio inabalável e por nunca medirem esforços para me ver realizar meus sonhos.

À minha irmã, Tamires Barbosa (*in memoriam*), que, embora fisicamente ausente, esteve presente em espírito durante toda essa caminhada, me dando força nos momentos mais difíceis. Sinto-me profundamente feliz por ter realizado o seu pedido. Eu te amo, para sempre.

Aos meus irmãos, Taíse Barbosa e Tássio Barbosa, e à minha sobrinha Laura Beatriz, agradeço o constante incentivo, por acreditarem em mim e por estarem sempre ao meu lado, oferecendo amor e apoio incondicional.

Às minhas tias, Amarilis, Albanise e Salete, agradeço pela ajuda, pelo carinho e pelo apoio que me deram ao longo dessa jornada. À minha prima, Michelle Fernandes, agradeço por todo apoio oferecido ao longo dessa caminhada.

À minha orientadora, Ruth Silveira do Nascimento, minha profunda gratidão. Mais do que uma excelente profissional, a senhora sempre se mostrou um ser humano maravilhoso, guiando-me com paciência, sensibilidade e sabedoria. Sua orientação foi essencial não apenas para a realização deste trabalho, mas também para o meu crescimento pessoal e acadêmico. Obrigada por acreditar em mim e por ter caminhado ao meu lado com tanto cuidado e generosidade.

Aos colegas que fiz durante a graduação, meu sincero agradecimento por compartilharem comigo os desafios, as vitórias e o aprendizado ao longo dessa jornada.

A Daniel Pirangi, por sanar todas as minhas dúvidas durante a pesquisa.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa do Laboratório de Eficiência Energética e Conforto Ambiental, meu agradecimento pela colaboração e pela troca de conhecimentos que enriqueceram minha experiência acadêmica.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), pelo fundamental apoio à pesquisa, sem o qual este trabalho não seria possível.

À minha banca pelas contribuições e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o êxito desta pesquisa para a minha formação acadêmica, meu muito obrigada.

## RESUMO

A urbanização crescente tem tornado mais complexa a gestão dos recursos hídricos, principalmente devido às alterações no uso do solo, ao aumento das áreas impermeabilizadas e às mudanças no clima. Dentro desse cenário, eventos extremos como inundações exigem planejamento urbano aliado à gestão eficiente das águas pluviais. A modelagem hidrodinâmica, integrada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), surge como uma ferramenta importante para identificar áreas vulneráveis e prever cotas de inundação em diferentes cenários de tempo de retorno (TR), oferecendo uma visão mais próxima da realidade. Este estudo teve como objetivo simular as inundações em um trecho da Bacia do Rio Bodocongó, em Campina Grande – PB, utilizando o modelo bidimensional do software HEC-RAS. Foram utilizados dados de chuva, topografia e uso e ocupação do solo, integrados em ambiente SIG. A partir dessas informações, foi inserido o Modelo Digital de Elevação (MDE) e definidos os coeficientes de rugosidade de Manning, além das condições de contorno de vazão, permitindo a simulação das manchas de inundação para TRs de 25, 50 e 100 anos, ao longo de 24 horas, com intervalos de 10 minutos. Os resultados indicaram que, nos três cenários simulados, as vazões superaram a capacidade do canal, provocando alagamentos em pontos críticos. Esse comportamento evidencia a vulnerabilidade da área urbana estudada, especialmente diante do avanço da impermeabilização e do assoreamento do açude a montante. Com isso, os dados obtidos podem auxiliar no planejamento urbano e na gestão do sistema de drenagem, contribuindo para a adoção de medidas mais eficazes de prevenção a inundações.

**Palavras-Chave:** inundações urbanas; sistema de informação geográfica; modelagem hidrodinâmica; HEC-RAS.

## ABSTRACT

The growing urbanization has made water resource management more complex, mainly due to changes in land use, increased impermeable surfaces, and climate change. Within this context, extreme events such as floods require urban planning combined with efficient stormwater management. Hydrodynamic modeling, integrated with Geographic Information Systems (GIS), emerges as an important tool for identifying vulnerable areas and estimating flood elevations under different return period (TR) scenarios, providing a representation closer to reality. This study aimed to simulate floods in a section of the Bodocongó River Basin, in Campina Grande – PB, using the two-dimensional model of the HEC-RAS software. Rainfall, topography, and land use data were used, all integrated into a GIS environment. Based on this information, the Digital Elevation Model (DEM) was implemented, Manning roughness coefficients were defined, and flow boundary conditions were set, allowing the simulation of flood extents for TRs of 25, 50, and 100 years over a 24-hour period, with 10-minute intervals. The results indicated that, in all three simulated scenarios, the flows exceeded the channel's capacity, causing flooding in critical sections. This behavior highlights the vulnerability of the studied urban area, especially in light of increasing impermeabilization and sedimentation of the upstream reservoir. Therefore, the data obtained can support urban planning and drainage system management, contributing to the adoption of more effective flood prevention measures.

**Keywords:** urban floods; geographic information system; hydrodynamic modeling; HEC-RAS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vítimas desabrigadas por desastres hídricos (enxurradas, inundações e alagamentos) .....	18
Figura 2 – Mortes registradas por desastres hídricos.....	18
Figura 3 – Eventos extremos em Campina Grande.....	19
Figura 4 – Características dos leitos do rio.....	22
Figura 5 – Medidas de controle.....	24
Figura 6 – Interface do HEC-RAS.....	25
Figura 7 – Organograma do processo metodológico.....	30
Figura 8 – Área de abrangência da Bacia de Bodocongó.....	31
Figura 9 – Bacia de Bodocongó no Perímetro Urbano de Campina Grande.....	32
Figura 10 Representação da área estudada.....	33
Figura 11 Vertedouro do Açude.....	34
Figura 12 – Estrutura da calha.....	34
Figura 13 – Dimensão da seção trapezoidal do canal.....	35
Figura 14 – Vias laterais do Canal de Bodocongó.....	35
Figura 15 – Mapa de declividade da Bacia de Bodocongó no perímetro urbano.....	37
Figura 16 – Pluviosidade mensal máxima num período de 1995 a 2024.....	39
Figura 17 – Modelo Digital de Elevação da área em estudo.....	40
Figura 18 – Região da malha adotada.....	41
Figura 19 – Uso e ocupação do solo.....	42
Figura 20 – Hidrograma com vazões máximas.....	46
Figura 21 – Perfil longitudinal do canal.....	48
Figura 22 – Velocidades de escoamento do canal.....	49
Figura 23 – Espacialização das Áreas Inundáveis.....	50
Figura 24 – Pontos selecionados para TRs 25, 50 e 100 anos	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média pluviométrica do Município de Campina Grande-PB num período de 30 anos, de 1995 a 2024.....	38
Tabela 2 – Valores de Manning adotados.....	42
Tabela 3 – Coordenadas geográficas para os TRs de 25, 50 e 100 anos	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANADEM	Modelo Digital de Terreno para a América do Sul
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNT	Modelo Numérico de Terreno
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OECD	Organisation For Economic Co-Operation and Development
PB	Paraíba
PIB	Produto Interno Bruto
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PROSABEN	Programa Nacional de Saneamento Básico e Pequenas Comunidades
QGIS	Quantum Geographic Information System
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINPDEC	Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TC	Tempo de Concentração
TOPODATA	Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil
TR	Tempo de Retorno
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
3.1 Crescimento Urbano .....	15
3.1.1 <i>Processo de urbanização na microbacia de Bodocongó</i> .....	15
3.2 Eventos Hidrológicos Extremos: Contexto Histórico.....	16
3.3 Segurança Hídrica.....	19
3.3.1 <i>Inundações</i> .....	20
3.3.2 <i>Inundações ribeirinhas</i> .....	22
3.3.3 <i>Inundações em razão da urbanização</i> .....	23
3.5 <i>Técnicas Compensatórias</i> .....	23
3.6 <i>Modelagem hidrodinâmica</i> .....	24
3.7 <i>Mapeamento de inundações</i> .....	26
3.7.1 <i>Aplicação do sensoriamento remoto e do geoprocessamento na identificação de áreas suscetíveis a inundações</i> .....	27
3.8 <i>Legislação e Políticas Públicas sobre Gestão de Inundações</i> .....	28
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	30
4.1 <i>Área em estudo</i> .....	30
4.2 <i>Delimitação da área em estudo</i> .....	32
4.2.1 <i>Características do canal</i> .....	34
4.3 <i>Declividade do terreno</i> .....	36
4.4 <i>Características Climáticas</i> .....	37
4.5 <i>Simulação no HEC-RAS</i> .....	39
4.5.1 <i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i> .....	39
4.5.2 <i>Construção da Malha</i> .....	40
4.5.3 <i>Coeficiente de Manning</i> .....	41
4.5.4 <i>Geração dos dados hidrológicos</i> .....	43
4.5.5 <i>Parâmetros de entrada para a simulação</i> .....	45
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	46
5.1 <i>Modelagem Hidrológica</i> .....	46
5.2 <i>Modelo Hidráulico</i> .....	47
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	55
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização no Brasil ocorreu de forma desordenada, causando impactos significativos nas bacias hidrográficas. O uso inadequado e a ocupação irregular do solo alteraram o balanço hídrico dessas bacias, contribuindo para a ocorrência de inundações e alagamentos. As ações humanas têm provocado a degradação de áreas ambientalmente relevantes, especialmente em regiões de bacias hidrográficas (Damame et al., 2019).

As inundações se tornaram recorrentes nos grandes centros urbanos e, na ausência de medidas preventivas, tendem a se agravar ao longo do tempo. Marengo et al. (2024) destacaram que esses eventos estão entre os desastres naturais mais letais, afetando milhões de pessoas em diversas regiões do mundo anualmente. Fatores como o crescimento populacional, a degradação dos ecossistemas e as mudanças climáticas contribuem para o aumento dos riscos associados a esses eventos.

O acelerado processo de urbanização tem agravado os problemas de drenagem durante os períodos chuvosos, intensificando as inundações em bacias hidrográficas urbanas (Ferreira, 2016).

A segurança da população depende fundamentalmente do reconhecimento das ameaças ambientais e sociais, bem como das vulnerabilidades específicas que afetam diferentes grupos comunitários. Esse diagnóstico preciso constitui a base para políticas públicas eficazes de prevenção e proteção civil. O planejamento e a gestão de riscos em áreas suscetíveis a inundações durante períodos de intensas chuvas são essenciais (Campos, 2022).

Araújo et al. (2024) demonstraram que os modelos hidrológicos exercem papel fundamental no dimensionamento de obras hídricas. Na prática, essas ferramentas permitem quantificar vazões e simular cenários críticos, informações essenciais tanto para o abastecimento regular quanto para a prevenção de desastres em eventos extremos. Na modelagem de inundações, o modelo computacional do Centro de Engenharia Hidrológica – Sistema de Análise de Rios (HEC-RAS) possibilita a análise das profundidades e da extensão das áreas inundadas em canais naturais e artificiais (Desalegn et al., 2021).

Dessa forma, ao delimitar as áreas inundáveis, torna-se possível identificar regiões inadequadas para a ocupação humana, além de estabelecer medidas complementares mais eficazes para mitigar os impactos das cheias nas áreas de maior risco e auxiliar em planos diretores, em obras de infraestrutura, no rezoneamento urbano.

A utilização do geoprocessamento em conjunto com a modelagem hidrodinâmica tem se mostrada essencial na avaliação de inundações em microbacias urbanas. A integração dos dados obtidos no HEC-RAS com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilita a geração de mapas temáticos e a visualização espacial dos impactos das inundações, auxiliando na identificação de áreas vulneráveis.

Considerando a relevância da modelagem hidrodinâmica para o estudo das inundações, este trabalho teve como objetivo avaliar as previsões de inundações provenientes da microbacia açude de Bodocongó, localizada no município de Campina Grande, Paraíba, por meio da modelagem hidrodinâmica com HEC-RAS. Ressalta-se que a microbacia do açude de bodocongó é considerada um "laboratório natural" para esse tipo de estudo devido ao grau de urbanização e importância histórica e socioeconômica.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar as previsões de inundações com modelo hidrodinâmico HEC-RAS em uma microbacia hidrográfica do Rio Bodocongó, em Campina Grande - PB.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Mapear e analisar o uso e ocupação do solo na bacia de Bodocongó, em Campina Grande, Paraíba, utilizando dados de SIG para identificar áreas vulneráveis a inundações.
- Desenvolver um modelo hidrodinâmico para simular o comportamento hidrológico em diferentes cenários de chuvas com tempos de retorno (TR) de 25, 50 e 100 anos.
- Gerar mapas de risco de inundação para auxiliar no planejamento urbano e na tomada de decisões por parte das autoridades municipais e estaduais.
- Propor recomendações para a gestão sustentável da drenagem urbana em Campina Grande – PB, com base nos resultados obtidos, visando a implementação de práticas que minimizem os impactos das inundações.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Crescimento Urbano**

Impulsionado pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico, deu-se início, no século XIX, ao processo de urbanização no Brasil. A instalação de indústrias nos centros urbanos, aliada à redução da demanda por trabalhadores no campo devido à introdução de máquinas agrícolas, resultou na migração desordenada da população rural para as cidades (Feliciano, 2022). Esse movimento não apenas marcou o início de uma transformação intensa na organização espacial, mas também uma série de desafios socioambientais que seriam replicados em diferentes regiões do país, mais precisamente em cidades de porte médio.

O uso inadequado e a ocupação desordenada do solo contribuem para alterações no balanço hídrico das bacias urbanizadas, resultando principalmente em inundações e alagamentos. De acordo com Righetto et.al (2009), a expansão urbana, marcada pela impermeabilização das bacias hidrográficas, reduz a infiltração de água no solo e aumenta o escoamento superficial, o que intensifica significativamente as inundações nas áreas urbanas. Em consoante, Nóbrega (2012) afirma que a ocupação desordenada das bacias hidrográficas, transformando-as em bacias urbanas, frequentemente gera desmatamentos, aterros e erosões. Essas alterações elevam o grau de impermeabilização do solo, diminuem a infiltração das águas pluviais e aumentam significativamente o escoamento superficial.

De acordo com Alves (2017) a solução para as inundações urbanas exige ações preventivas (em áreas livres) e corretivas (em zonas consolidadas), sempre com planejamento integrado da bacia hidrográfica. Contudo, as intervenções públicas frequentemente se limitam a obras fragmentadas em cursos d'água urbanos, agravando os riscos ao não considerar o sistema hidrológico em sua totalidade.

##### ***3.1.1 Processo de urbanização na microbacia de Bodocongó***

Em Campina Grande, município da Paraíba, a urbanização na microbacia de Bodocongó, segue o mesmo padrão de crescimento desordenado observado em muitas outras áreas urbanas do Brasil. A impossibilidade de utilização da água do Açude de Bodocongó para abastecimento humano, devido à alta salinidade, levou à

ocupação de seu entorno pelas primeiras fábricas do município, marcando o início da industrialização em Campina Grande e atraindo um grande contingente populacional, principalmente sertanejos que fugiam da seca em busca de trabalho (Jales; Filho, 2020).

Queiroz (2006) aponta que a ocupação inicial ocorreu de forma desordenada, com a construção de casas em terrenos estreitos no estilo vernacular, tipologia predominante nas áreas de expansão urbana da época.

Em decorrência da instalação do novo distrito industrial de Campina Grande, ocorreu o esvaziamento fabril ao redor do Açude a partir dos anos 1960, devido à migração das empresas (Jales; Filho, 2020). Atualmente, encontram-se instalados nas áreas circunvizinhas do açude, os bairros Bodocongó e Novo Bodocongó (Vila Teimosos) e neles estão situadas duas instituições de ensino superior: a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), fundada em 1952, e a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), fundada em 1966.

Essa dinâmica de alteração da paisagem influencia diretamente o processo de eventos extremos, podendo intensificar seus efeitos ao transferir o impacto para outras áreas ou ampliar a extensão das regiões afetadas (Reis, 2015). Nessa mesma perspectiva, Pedroso e Tybush (2021), afirmam que os desastres ambientais de natureza hidrológica possuem alta frequência no Brasil, que embora sejam fenômenos naturais, há uma clara ligação entre sua ocorrência e fatores antrópicos, como mudanças climáticas, gestão inadequada do meio urbano, omissões governamentais e o estilo de vida da população, resultando na intensificação dos eventos de alagamentos, enchentes e inundações.

### **3.2 Eventos Hidrológicos Extremos: Contexto Histórico**

Historicamente, o ser humano buscou se estabelecer próximo aos rios, aproveitando-os como meio de transporte, fonte de água potável e local para descarte de dejetos, o que expõe as comunidades aos riscos associados a eventos hidrológicos extremos (Tucci; Bertoni, 2003).

Ao longo da história, diversas civilizações aprenderam a coexistir com inundações, tanto frequentes quanto esporádicas. Hoyt e Langbein (1959) relatam eventos significativos, como a grande cheia no Vale do Nilo durante a XXIII Dinastia do Egito, em 747 a.C., e a inundações do rio Pó, na Itália, em 1951, que resultou em

perdas humanas e econômicas expressivas. Esses eventos demonstram que, mesmo em diferentes contextos geográficos e temporais, as inundações sempre representaram desafios importantes à organização urbana e à segurança das populações.

Conforme Santos (2013), desde o início dos anos 2000, o Brasil tem vivenciado diversos eventos hidrológicos extremos. Na região Nordeste, particularmente na bacia do rio Mundaú, em Pernambuco, eventos marcantes ocorreram em 2000 e 2010, sendo o de junho de 2010 especialmente destrutivo nos estados de Pernambuco e Alagoas. Esse episódio resultou em danos significativos em cidades situadas nas bacias dos rios Capibaribe, Una, Sirinhaém, Mundaú e Paraíba.

O Rio Grande do Sul viveu uma de suas maiores tragédias em maio de 2024. As enchentes que assolaram o estado deixaram um rastro de destruição: mais de 150 vidas perdidas, 600 mil pessoas obrigadas a deixar suas casas e um cenário de caos que levou 78 municípios a decretar calamidade pública, enquanto outros 340 declararam estado de emergência (Rio Grande do Sul, 2024).

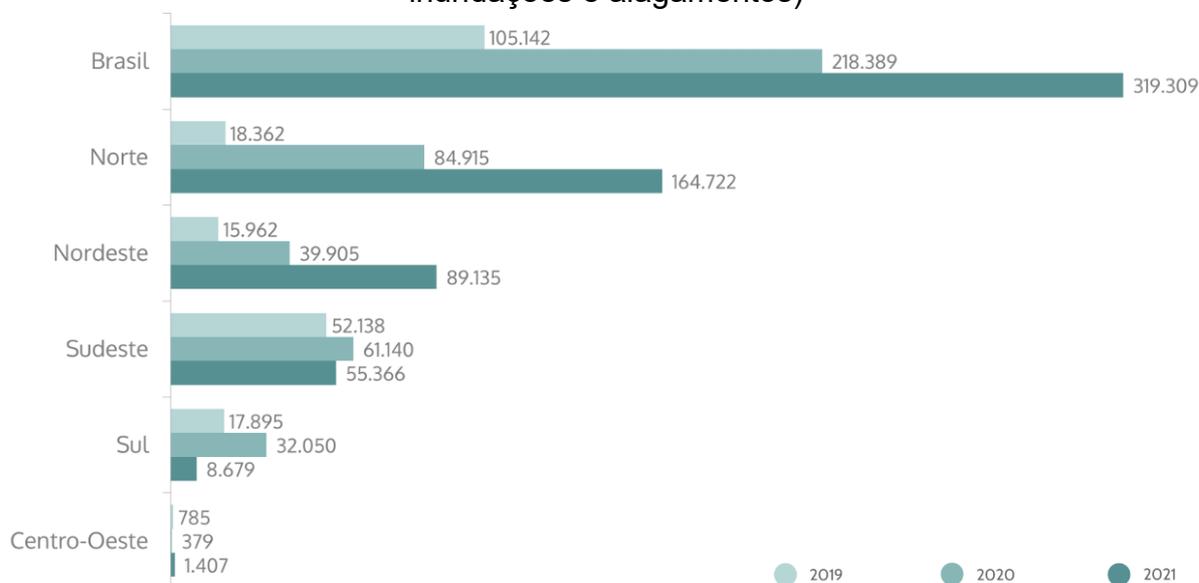
Essas tragédias recentes reflete um problema crônico no país. Dados alarmantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento mostram que, entre 2016 e 2021, 44% das cidades brasileiras (2.016 de 4.573 municípios que reportaram informações) sofreram com enxurradas, alagamentos ou inundações em áreas urbanas (Ministério das Cidades 2023). Segundo o mesmo órgão, no que se refere ao componente de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, todos os indicadores avaliados apresentaram retrocessos em 2021 em comparação com 2020. Observou-se uma leve deterioração nos resultados que apontam para o risco de inundações nas áreas urbanas das macrorregiões Norte e Sudeste, refletindo, consequentemente, na média nacional.

Quando comparados ao ano anterior, os dados de 2021 também indicaram um aumento na ocorrência de enxurradas, inundações ou alagamentos nos últimos cinco anos, tanto no país como em quase todas as macrorregiões. Isso se deve a diversos fatores, dentre eles, a drenagem inadequada de águas pluviais (Madakumbura et al., 2021).

Esses eventos, além de causarem danos materiais significativos, levaram inúmeras pessoas a óbito e deixaram muitas outras desabrigadas, evidenciando a gravidade e a urgência de ações efetivas para mitigar esses impactos. A Figura 1

mostra uma espacialização da distribuição de vítimas desabrigadas por desastre hídrico nas regiões do Brasil.

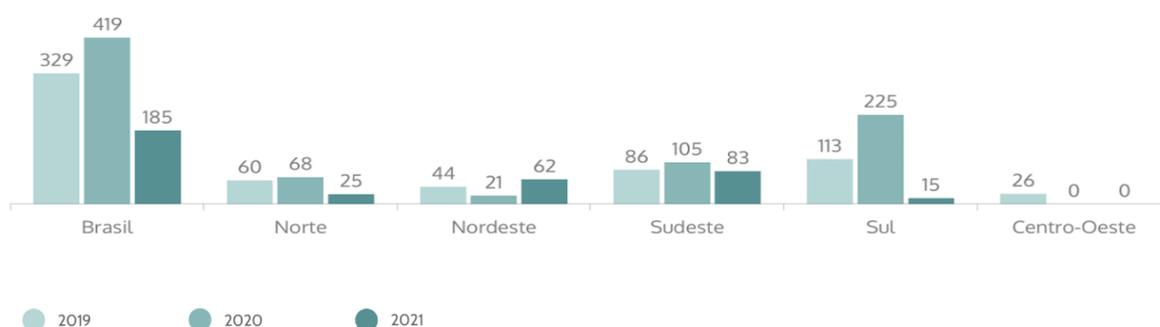
**Figura 1 - Vítimas desabrigadas por desastres hídricos (enxurradas, inundações e alagamentos)**



**Fonte:** PROSABEN (2023), com dados do SNIS/MDR (2021), conforme Nota Técnica.

A Figura 2 ilustra a dimensão dessas tragédias, mostrando cenas de destruição e desespero enfrentados pelas comunidades afetadas.

**Figura 2 - Mortes registradas por desastres hídricos**

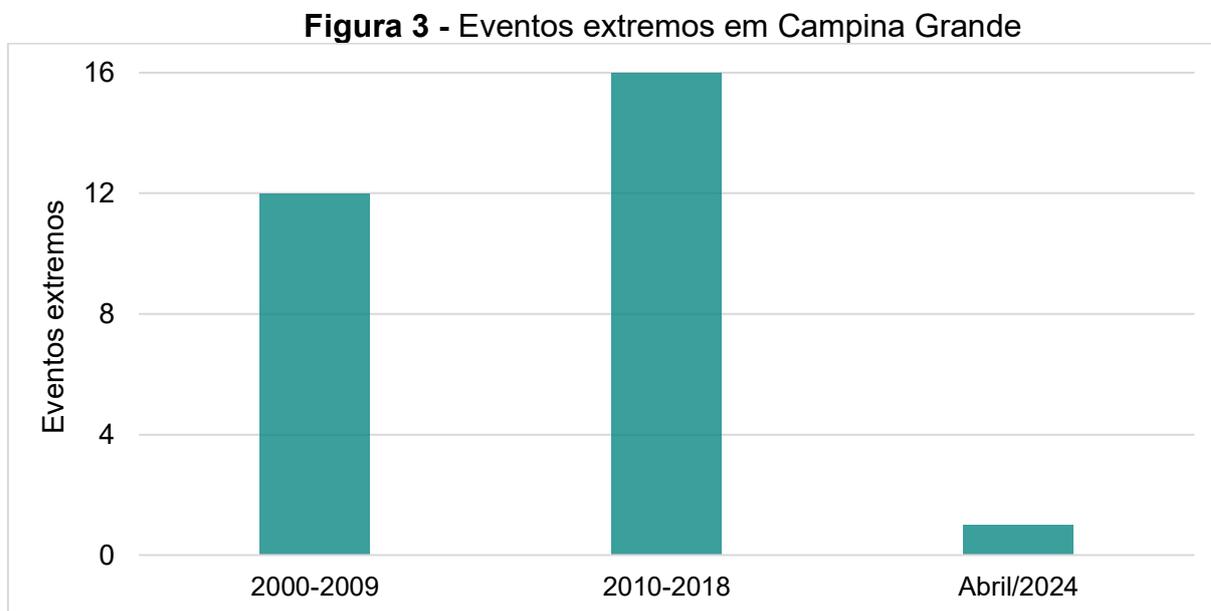


**Fonte:** PROSABEN (2023) com dados do SNIS/MDR (2021), conforme Nota Técnica.

Em 2021, conforme os dados declarados ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), enxurradas, inundações e alagamentos resultaram em 319.309 pessoas desalojadas ou desabrigadas e 185 óbitos. Os impactos dos desastres hídricos em 2021 revelaram padrões regionais distintos: enquanto o Norte concentrou 165 mil casos de desalojados (maior volume nacional), a distribuição de

óbitos mostrou predominância no Sudeste (45% do total) e Nordeste (34%), com 83 e 62 mortes, respectivamente (SNIS, 2021).

Em Campina Grande, registraram-se alguns eventos extremos relacionados a chuva. A Figura 3 apresenta o registro de tais eventos.



**Fonte:** Adaptado de Sena (2019).

Cabe ressaltar que desses 16 eventos, apenas para o ano de 2011 foram registrados 7 eventos extremos. Segundo o Paraíba Online, em abril de 2024, as fortes chuvas em Campina Grande provocaram o transbordamento do Canal de Bodocongó, resultando na inundação de algumas residências.

Esses exemplos históricos destacam como eventos hidrológicos extremos têm impactado comunidades ao longo do tempo, evidenciando a necessidade de estratégias de adaptação e convivência com os riscos associados a esses fenômenos. Nesse contexto, a segurança hídrica emerge como um aspecto fundamental, não apenas para mitigar os efeitos das inundações, mas também para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos e a resiliência das populações frente às mudanças climáticas e à intensificação desses eventos (Brasil, 2025).

### 3.3 Segurança Hídrica

Segurança hídrica é a capacidade de garantir que a população tenha acesso confiável e sustentável à água de qualidade e em quantidade suficiente para atender

às necessidades humanas (como consumo, produção de alimentos e atividades econômicas) e ambientais, ao mesmo tempo em que se previnem riscos associados à água, como secas, inundações, contaminação e degradação dos recursos hídricos (OECD, 2013).

Segundo a definição proposta pela ONU e adotada pela ANA:

A segurança hídrica ocorre quando há garantia, de forma equilibrada e sustentável, água em quantidade suficiente para abastecer populações, atividades econômicas e ecossistemas; qualidade adequada aos usos previstos; prevenção eficaz contra riscos de secas e inundações; e mecanismos de governança que assegurem gestão integrada desse recurso. Essas quatro dimensões – disponibilidade, qualidade, resiliência e institucionalidade – constituem os pilares fundamentais para o planejamento hídrico nacional, conforme a ANA (2019) e ONU (2013).

As definições de segurança hídrica não se limitam apenas à disponibilidade e ao acesso à água para necessidades básicas, mas também abrangem a remoção de águas residuais, saneamento, problemas de saúde relacionados e os impactos socioeconômicos de secas e inundações. Esses aspectos estão diretamente ligados à gestão dos recursos hídricos e à gestão de riscos e perigos para a população e o ambiente (Rodrigues, 2021).

As inundações representam um dos principais desafios relacionados à segurança hídrica em áreas urbanas, especialmente em microbacias impactadas pela expansão desordenada das cidades, resultando em prejuízos socioeconômicos e ambientais.

### **3.3.1 Inundações**

As inundações são fenômenos tão antigos quanto o surgimento das cidades e outros tipos de aglomerados urbanos. Elas ocorrem quando um corpo d'água transborda suas margens, invadindo áreas adjacentes devido as chuvas intensas, obstrução do fluxo hídrico ou falhas em sistemas de drenagem. Segundo Ramos (2013), as inundações são fenômenos hidrológicos extremos com frequência variável, podendo ser naturais ou resultantes da ação humana. Ainda, como afirmam Tucci e Bertoni (2003), a inundação ocorre quando os sistemas de escoamento, como rios, riachos e galerias pluviais, não conseguem comportar o volume de água, levando-a a invadir áreas destinadas à moradia, transporte, recreação, comércio e outras

atividades humanas. Cabe salientar que, elas envolvem a submersão de áreas que normalmente estão secas e sua periculosidade depende da magnitude alcançada, a velocidade de propagação e a frequência com que ocorrem.

De acordo os dados do Escritório das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres (UNDRR, 2023) o Brasil está entre os 15 países com maior exposição populacional a inundações no cenário global. No período de 2000 a 2022, registrou-se que aproximadamente 9,2 milhões de brasileiros foram diretamente impactados por eventos dessa natureza, o que evidencia a vulnerabilidade nacional frente a extremos hidrológicos. Em 2023, eventos climáticos extremos, como chuvas excessivas, resultaram em desastres significativos, como inundações, enxurradas, alagamentos e deslizamentos, afetando diversos municípios e resultando em graves impactos sociais e econômicos. Em novembro de 2024, aproximadamente 34,5 mil brasileiros foram atingidos por esses eventos, com mortes registradas e cerca de 500 pessoas deslocadas de suas casas (Confederação Nacional de Municípios, 2024).

Embora o município de Campina Grande - PB esteja inserido no semiárido brasileiro e apresente um histórico de escassez hídrica, há registros de períodos de elevada precipitação, durante os quais são documentadas inundações em diversos pontos da cidade. Assim como muitas outras cidades brasileiras, enfrenta continuamente problemas de inundações e alagamentos (Rufino; Santos; Tsuyuguchi, 2015).

Segundo Silva (2019), as chuvas intensas, especialmente em áreas com solos pouco profundos, como os de Campina Grande, favorecem o escoamento superficial em vez da infiltração da água. Esse fenômeno contribui para a gravidade das inundações, uma vez que o excesso de água transporta sedimentos, dejetos e resíduos das áreas mais altas para as regiões mais baixas, causando impactos severos nessas localidades.

Segundo Zhou et al. (2017), a suscetibilidade à inundação está relacionada aos conceitos de exposição e vulnerabilidade, os quais determinam as condições para que um grupo seja considerado de risco, essa análise geralmente envolve fatores como aspectos sociais, econômicos e as características naturais das áreas habitadas.

Os impactos das inundações recaem desproporcionalmente sobre populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica, revelando uma clara desigualdade ambiental. Em Campina Grande, esse padrão se manifesta com especial gravidade. Conforme demonstrado por Silva et al. (2020), os bairros classificados com alta e

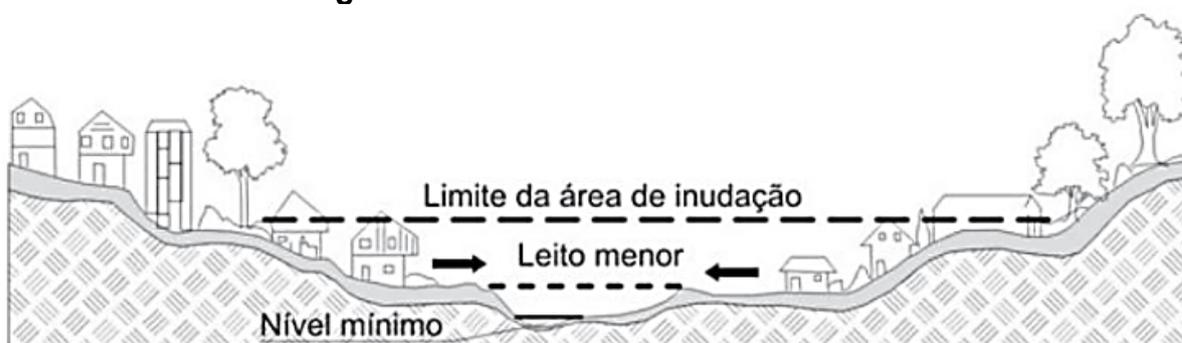
altíssima vulnerabilidade concentram famílias expostas a um complexo quadro de riscos interligados - desde perigos ambientais até precariedade de infraestrutura urbana, passando por acesso limitado a serviços de saúde, insegurança econômica e exclusão social.

Assim, as inundações podem ser classificadas em dois processos distintos relacionados ao escoamento pluvial, que podem ocorrer de forma isolada ou simultânea: as inundações ribeirinhas e as inundações decorrentes da urbanização (Tucci; Porto; Barros, 1995).

### 3.3.2 Inundações ribeirinhas

De acordo com Costa (2013), as inundações em áreas ribeirinhas decorrem de precipitações intensas e do acúmulo excessivo de água que não pode ser drenado de forma eficiente, levando à ocupação das várzeas conforme a topografia das regiões próximas aos rios. Tucci (2008) complementa que essas são inundações naturais que ocorrem no leito maior dos rios, sendo resultado de processos naturais, fruto da dinâmica hidrológica das bacias. Isso se manifesta quando o volume de escoamento excede a capacidade do leito menor do rio, atingindo o leito maior (Figura 4).

**Figura 4 – Características dos leitos do rio**



Fonte: Tucci (2008).

Quando a população ocupa o leito maior, uma área naturalmente destinada à expansão do rio durante períodos chuvosos, os impactos das inundações tornam-se frequentes e mais graves. Conforme destacado por Tucci (2003), como os rios se expandem de forma irregular ao longo do tempo nos períodos de cheia, a ocupação dessas áreas pela população a expõe diretamente aos riscos e danos associados a esse fenômeno.

### **3.3.3 Inundações em razão da urbanização**

As inundações decorrentes da urbanização estão diretamente relacionadas às mudanças no uso do solo provocadas pelo crescimento urbano. Além da impermeabilização do solo, o desenvolvimento desordenado das cidades e a falta de planejamento adequados intensificam a frequência e a gravidade dessas inundações.

Esse problema ocorre devido ao aumento do escoamento superficial (Feliciano, 2022), que sobrecarrega os sistemas de drenagem, muitas vezes incapazes de suportar o grande volume de água gerado por chuvas intensas (Tucci, 2005).

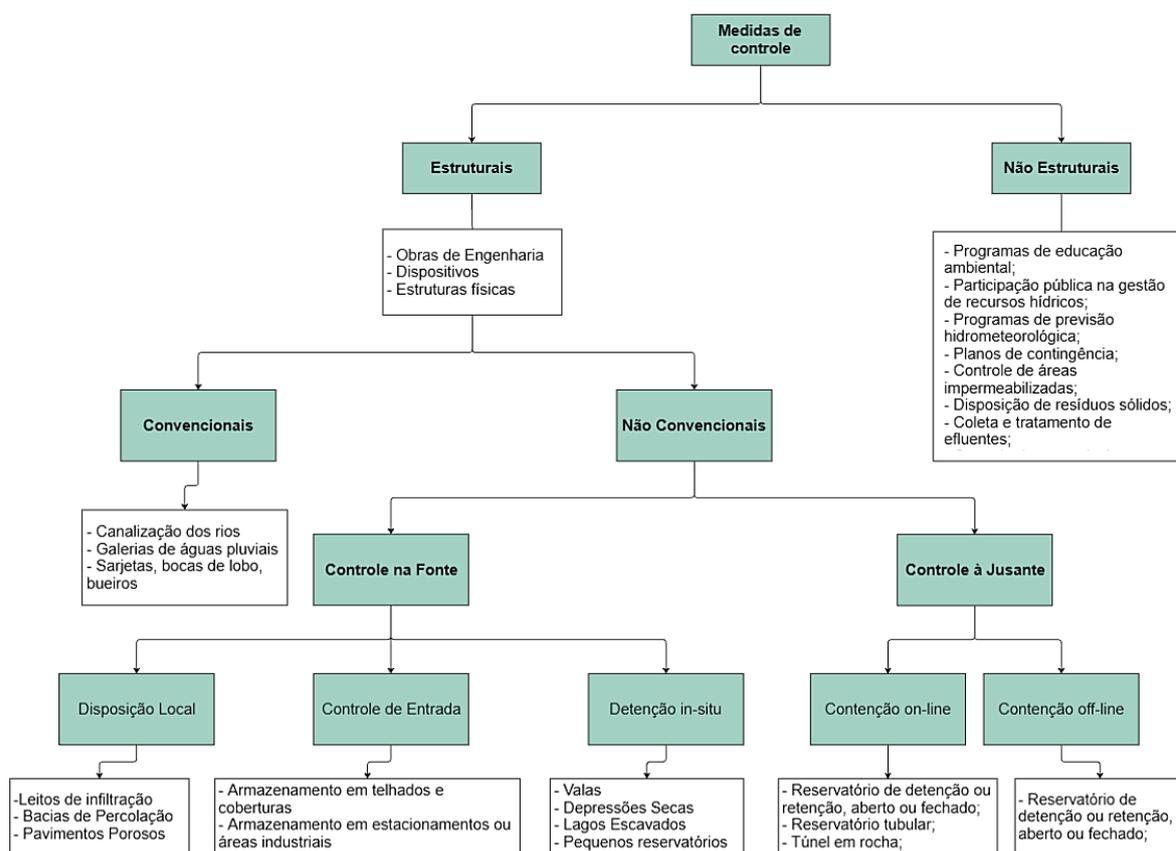
### **3.5 Técnicas Compensatórias**

De acordo com Buffo (2022), as técnicas compensatórias desempenham um papel importante no enfrentamento das enchentes urbanas, buscando harmonizar o crescimento das cidades com a preservação do ciclo natural das águas. Essas estratégias contribuem para aprimorar a drenagem, controlando o escoamento das águas pluviais e potencializando a eficiência dos sistemas já implantados.

Ao planejar ações para minimizar os efeitos das inundações em áreas urbanas, é fundamental levar em conta as características específicas de cada bacia. Em regiões com elevado grau de urbanização, medidas como a criação de bacias de retenção ou o alargamento dos canais podem não ser viáveis, exigindo alternativas mais adequadas à realidade local (Barbosa, 2020).

As técnicas compensatórias voltadas ao controle de inundações englobam medidas estruturais quanto não estruturais, atuando de forma direta e indireta sobre a drenagem urbana (Buffo, 2022). Segundo Amaral, Santoro e Tominaga (2009), as medidas estruturais consistem em intervenções físicas no sistema hídrico urbano, geralmente por meio de obras de engenharia de maior porte e custo elevado. Com base em Buffo (2022), as medidas não estruturais têm caráter social, econômico e administrativo, com foco na mitigação dos prejuízos e na adaptação da população aos eventos de inundação, por meio de estratégias como controle da ocupação urbana, sistemas de alerta, seguros e ações de educação ambiental. Na Figura 5, há a representação de medidas que podem ser adotadas.

**Figura 5 – Medidas de controle**



Fonte: Adaptado de Canholi (2005), FCTH (2012) e Setti et al. (2024).

É importante compreender que nenhuma medida, por mais bem planejada que seja, tem o poder de eliminar completamente as inundações. O objetivo dessas ações é reduzir ao máximo os impactos causados por esses eventos, promovendo mais segurança e qualidade de vida para a população.

### 3.6 Modelagem hidrodinâmica

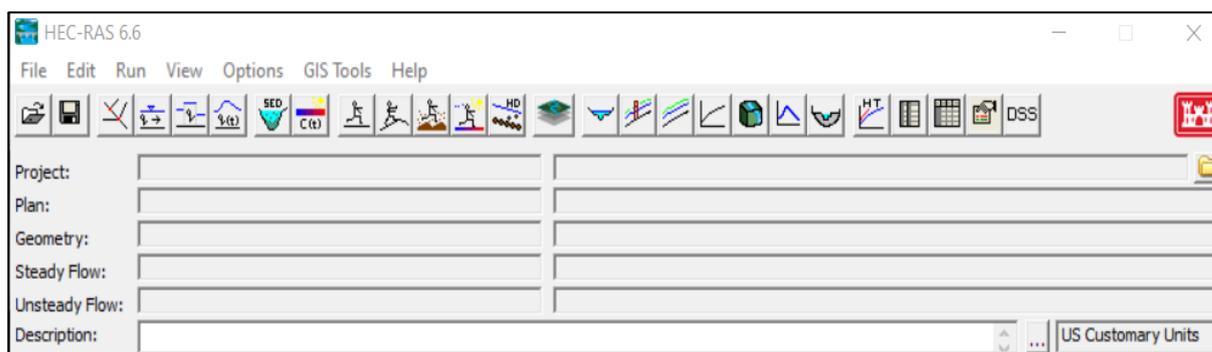
As técnicas de modelagem hidrodinâmica desempenham um papel fundamental no planejamento, projeto e gerenciamento de sistemas de drenagem urbana, possibilitando uma análise detalhada do comportamento da água e contribuindo para a redução dos impactos causados por eventos hidrológicos extremos. No contexto urbano, essas modelagens permitem aos gestores implementarem medidas eficazes de prevenção e controle de inundações (Leite et al., 2024).

Além disso, o uso de modelos para simular o comportamento do ambiente, considerando suas diversas variáveis, tem facilitado a quantificação e compreensão de fenômenos hidrológicos (Garcia, 2021). Esses modelos são representações simplificadas de um objeto ou sistema real, desenvolvidos para prever seu comportamento, transformação ou evolução ao longo do tempo.

A modelagem hidrodinâmica pode ser conduzida por meio de diferentes programas computacionais. Um dos softwares de grande aplicação é o HEC-RAS (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System), trata-se de um software livre desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers).

De acordo com Silva (2013), o HEC-RAS é amplamente utilizado devido a diversos fatores, destacando-se sua interface intuitiva, a facilidade de aplicação prática e a necessidade reduzida de inserção de dados. O software realiza cálculos hidráulicos em sistemas de canais naturais ou artificiais, utilizando a resolução das equações de Saint-Venant em uma ou duas dimensões para a modelagem hidráulica (US Army Corps of Engineers, 2020). A figura 6 mostra a ilustração da interface do programa computacional.

**Figura 6 - Interface do HEC-RAS**



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

O *software* possibilita a modelagem em uma dimensão (1D), em duas dimensões (2D) e de forma combinada (1D/2D) para simulações de escoamento em condições permanentes e não permanentes. De acordo com Assis (2024), o escoamento permanente é definido como aquele em que, para cada ponto do domínio espacial analisado, a vazão permanece constante em todos os instantes considerados no processo de modelagem.

Em contrapartida, o escoamento não permanente ocorre quando as propriedades de fluxo variam com o tempo. Esse tipo de escoamento é o mais comum em canais de seção aberta, pois está continuamente sujeito ao aporte de vazões variáveis, resultantes de chuvas e outros escoamentos superficiais (Feliciano, 2022).

Além das análises hidráulicas, o HEC-RAS também permite a incorporação de elementos de engenharia hidráulica nos canais, como bueiros, pontes, barragens e bacias de retenção, entre outros (USACE, 2016). Dessa forma, a modelagem matemática, torna-se fundamental para a avaliação de áreas inundáveis. Essa abordagem justifica a aplicação de modelos matemáticos devido à sua agilidade e confiabilidade no processamento dos fenômenos envolvidos.

### 3.7 Mapeamento de inundações

O mapeamento de inundações é uma técnica essencial para monitorar, prever e mitigar os impactos de enchentes. De acordo com Antzoulatos et al. (2022), o mapeamento de inundações é essencial para a compreensão dos padrões históricos e das projeções futuras desses eventos, bem como para a identificação de áreas vulneráveis que podem ser afetadas

Para Andjelkovic (2001), um dos aspectos positivos dos mapas de inundação é a capacidade de ilustração, que serve como base para discussões sobre as medidas a serem implementadas com o intuito de reduzir os danos causados por eventuais inundações, além de fomentar ideias para o desenvolvimento sustentável nessas áreas.

De acordo com Tucci (2003), os mapas de inundação podem ser classificados em dois tipos principais:

- **Mapa de Planejamento:** que delimita as áreas afetadas por cheias associadas a tempos de retorno específicos
- **Mapa de Alerta:** indica, em pontos de controle ou esquinas estratégicas, o nível de água a partir do qual a inundação se inicia. Este último permite que os moradores acompanhem a evolução da enchente por meio da observação de réguas instaladas nos locais.

Para Barbosa (2006), a criação de mapas de inundação é complexa devido à falta de dados precisos, podendo-se dividir o estudo em duas etapas: a primeira delimita áreas de inundação com base em mapas topográficos e marcas de

enchentes, enquanto a segunda refina essa delimitação com topografia detalhada e batimetria do rio. Por fim, o mapa é finalizado com ferramentas de geoprocessamento, que integram informações como arruamento, vegetação e hidrografia.

### ***3.7.1 Aplicação do sensoriamento remoto e do geoprocessamento na identificação de áreas suscetíveis a inundações***

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a obtenção de dados espaciais por meio de imagens de satélite e sensores aerotransportados. Ele possibilita a análise e o monitoramento de diversas variáveis ambientais, como cobertura do solo, uso da terra e condições hidrológicas, sendo amplamente utilizado no mapeamento de áreas vulneráveis a inundações (Soares, 2024).

O geoprocessamento complementa o sensoriamento remoto ao permitir o processamento dos dados adquiridos pelos sensores. Ele consiste no processamento e análise de dados geoespaciais através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), viabilizando a criação de mapas temáticos e estudos detalhados sobre variáveis ambientais e territoriais (Vinhal, 2023). Segundo Oliveira (2013), é possível desenvolver processos complexos que contribuem para a composição e interpretação dos resultados almejados.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas essenciais na modelagem de áreas inundáveis, por meio de um conjunto de operações baseadas no Modelo Digital de Elevação (MDE) e no Modelo Numérico do Terreno (MNT), além das elevações do nível da água obtidas por modelagem hidráulica (Marciano, 2019).

Westen (2013) destaca que o geoprocessamento se apresenta como uma ferramenta eficaz na gestão de riscos de desastres, possibilitando a adoção de diversas metodologias para mapeamento de risco. Esse recurso auxilia na tomada de decisões em emergências, resultando em uma gestão mais eficiente e na formulação de estratégias preventivas mais eficazes, baseadas na análise e no mapeamento dos riscos.

Sendo assim, o geoprocessamento, aliado à modelagem hidrodinâmica, permite a identificação de áreas de risco de inundação por meio da simulação do comportamento da água em diferentes cenários, facilitando o planejamento e a gestão de riscos.

### **3.8 Legislação e Políticas Públicas sobre Gestão de Inundações**

A Lei nº 12.608/2012, sancionada em 10 de abril de 2012, institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e estabelece diretrizes para a gestão de riscos e respostas a desastres naturais, incluindo inundações. Essa lei é um marco importante para a prevenção, mitigação e resposta a eventos como enxurradas, alagamentos e inundações no Brasil. Entre seus principais objetivos, destacam-se a redução dos riscos de desastres por meio de ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação, além da promoção da integração entre políticas de desenvolvimento urbano, meio ambiente e recursos hídricos, visando evitar ocupações em áreas de risco (Brasil, 2012).

Essa lei é complementada pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), definido pela lei nº 11.445/2007, que visa universalizar os serviços de drenagem urbana e reduzir os impactos de inundações até 2033 (Brasil, 2007). No entanto, a implementação dessas políticas ainda enfrenta desafios, como a falta de recursos financeiros e técnicos nos municípios, especialmente em regiões com alta vulnerabilidade socioeconômica, como o semiárido brasileiro.

A Lei nº 12.608/2012 enfatiza a importância de identificar e mapear áreas de risco de inundações, especialmente em regiões urbanas, e determina a elaboração de planos de contingência e ações preventivas para reduzir os impactos desses eventos. Ela promove a adoção de medidas estruturais, como obras de drenagem, barragens e canalização de rios, e não estruturais, como educação ambiental e planejamento urbano, para prevenir inundações.

A Lei nº 12.608/2012 também define as responsabilidades da União, estados, municípios e Distrito Federal na gestão de riscos e resposta a desastres, estabelecendo que os municípios devem incluir a prevenção de inundações em seus planos diretores e políticas de uso do solo. Ela cria o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC), que integra ações de proteção e defesa civil em todos os níveis de governo, com foco na redução de riscos e na resposta a desastres, incluindo inundações (Brasil, 2012). Por fim, prevê ações de recuperação de áreas atingidas, incluindo o reassentamento de populações em áreas seguras, como forma de reduzir a exposição a futuros desastres.

Cabe destacar ainda que o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 11, estabelecido pela ONU, propõe cidades mais resilientes e inclusivas até

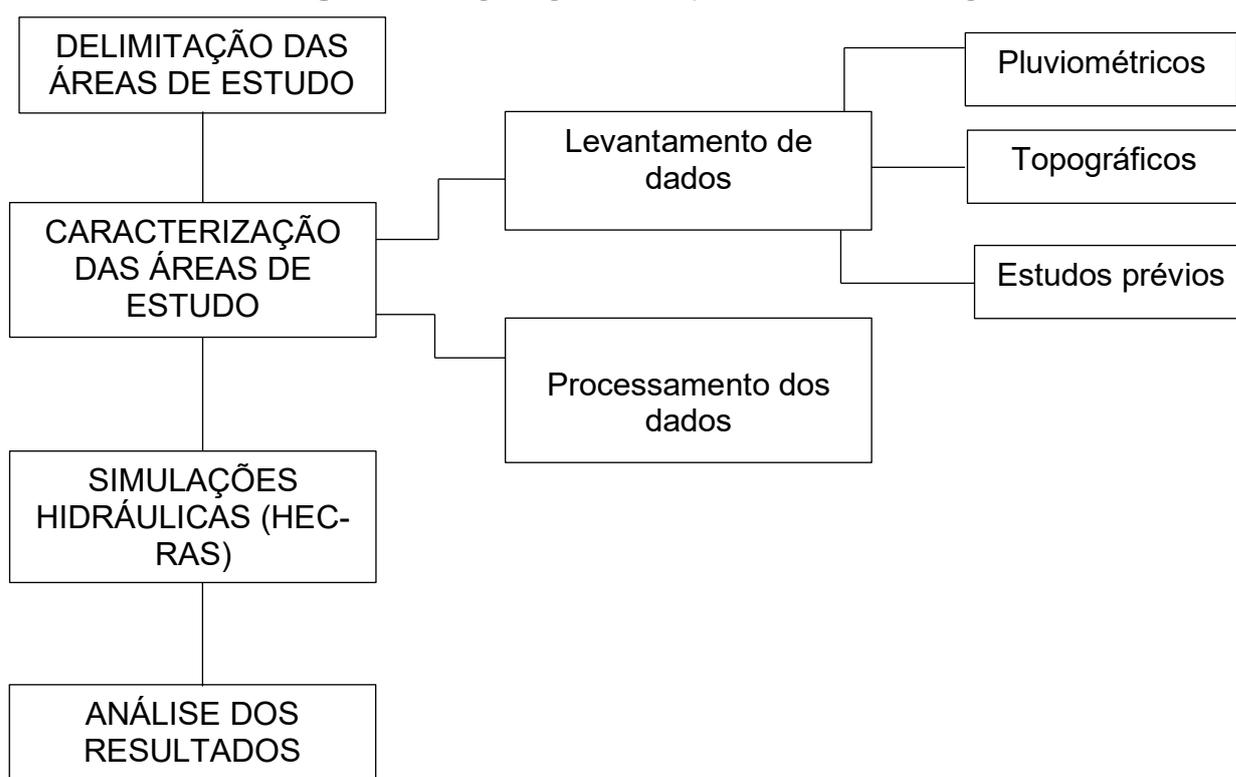
2030, o que demanda ações específicas para redução de riscos hidrológicos em áreas vulneráveis. Dentre suas metas, destaca-se a redução, até 2030, do número de mortes e de pessoas afetadas por desastres, incluindo os relacionados à água, com especial atenção à proteção dos mais pobres e vulneráveis (ONU, 2015). Essa meta global está alinhada com os objetivos da Lei nº 12.608/2012, evidenciando a importância de uma abordagem integrada e sustentável para o enfrentamento das inundações.

Portanto, além de fortalecer as políticas existentes, é essencial promover uma maior integração entre as esferas governamentais e a sociedade civil, garantindo que as ações de prevenção e resposta sejam eficientes e inclusivas. Somente assim será possível construir cidades mais resilientes e sustentáveis, capazes de enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização acelerada.

## 4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, além da revisão bibliográfica, a pesquisa foi estruturada em três etapas metodológicas principais: (i) delimitação da área em estudo; (ii) caracterização da região selecionada e (iii) realização de simulações hidráulicas. Após a conclusão dessas etapas, procede-se à análise dos resultados e às considerações finais. A metodologia adotada pode ser visualizada na Figura 7.

**Figura 7 - Organograma do processo metodológico**



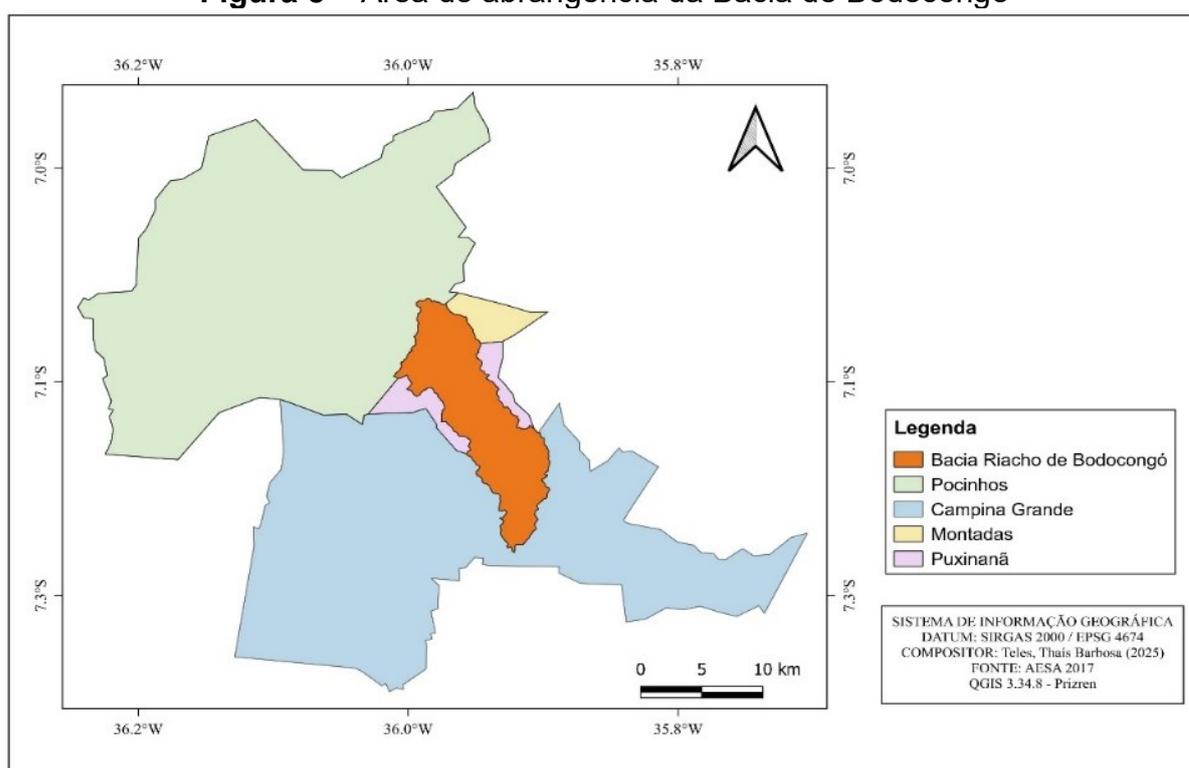
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

### 4.1 Área em estudo

A cidade de Campina Grande está localizada no Agreste da Paraíba, na região geográfica imediata de Campina Grande, conforme a divisão mais recente. Sua sede está posicionada a uma latitude Sul de 7°13'50" e longitude Oeste de 35°52'52". Com uma área de 591,66 km<sup>2</sup> e uma população de 419.379 habitantes, de acordo com dados oficiais do IBGE (2022), Campina Grande apresenta uma densidade demográfica de 708,82 hab/km<sup>2</sup>. A altitude média é de 550 metros, com variações entre 440 metros na porção leste e mais de 600 metros na região norte.

O sistema de drenagem pluvial de Campina Grande é dividido em quatro bacias principais. Para este estudo, foi selecionada a sub-bacia a jusante do Açude de Bodocongó, que integra um importante canal de macrodrenagem – o Canal de Bodocongó – além de trechos com escoamento em estado natural. A Bacia do Rio Bodocongó se estende do extremo sul do município de Montadas até o Bairro da Catingueira, em Campina Grande, cobrindo uma distância aproximada de 25 quilômetros no sentido norte-sul. Dentro de Campina Grande, o rio é interceptado por uma represa localizada no Bairro de Bodocongó (Figura 8).

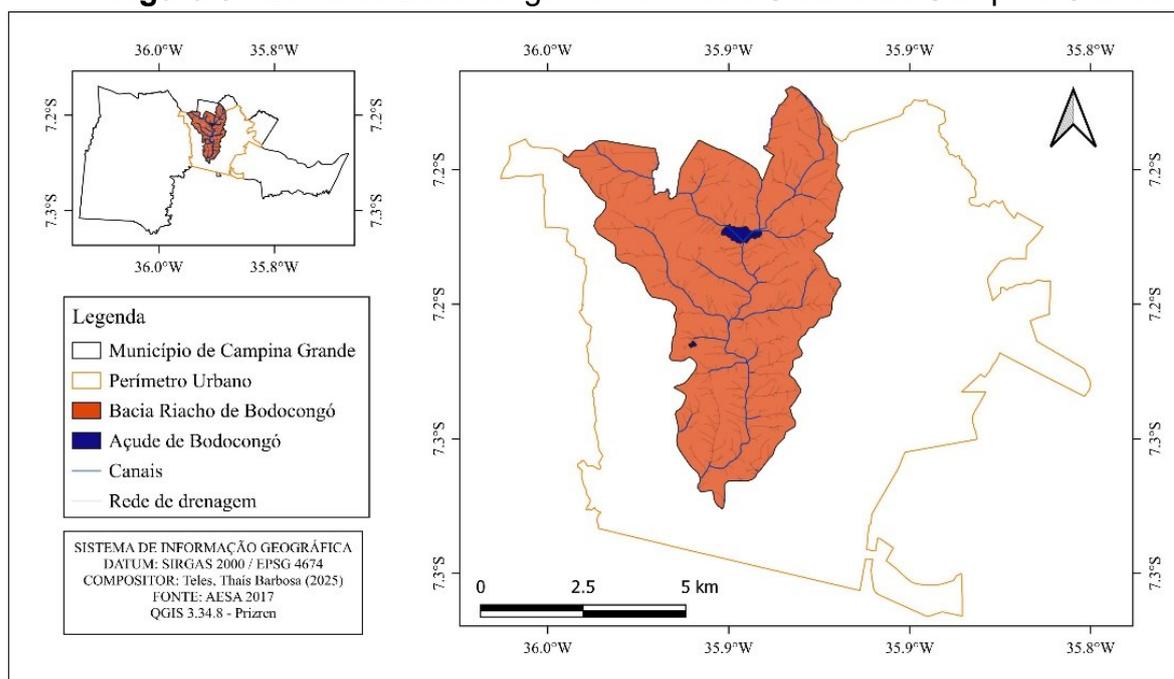
**Figura 8 – Área de abrangência da Bacia de Bodocongó**



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Após identificar a abrangência da Bacia de Bodocongó, o foco recai sobre a área urbana de Campina Grande, onde o riacho desempenha um papel significativo. O mapa mostrado na Figura 9 destaca a interação entre a bacia hidrográfica e o perímetro urbano da cidade, ilustrando como o desenvolvimento urbano impacta o curso d'água.

**Figura 9 - Bacia de Bodocongó no Perímetro Urbano de Campina Grande**



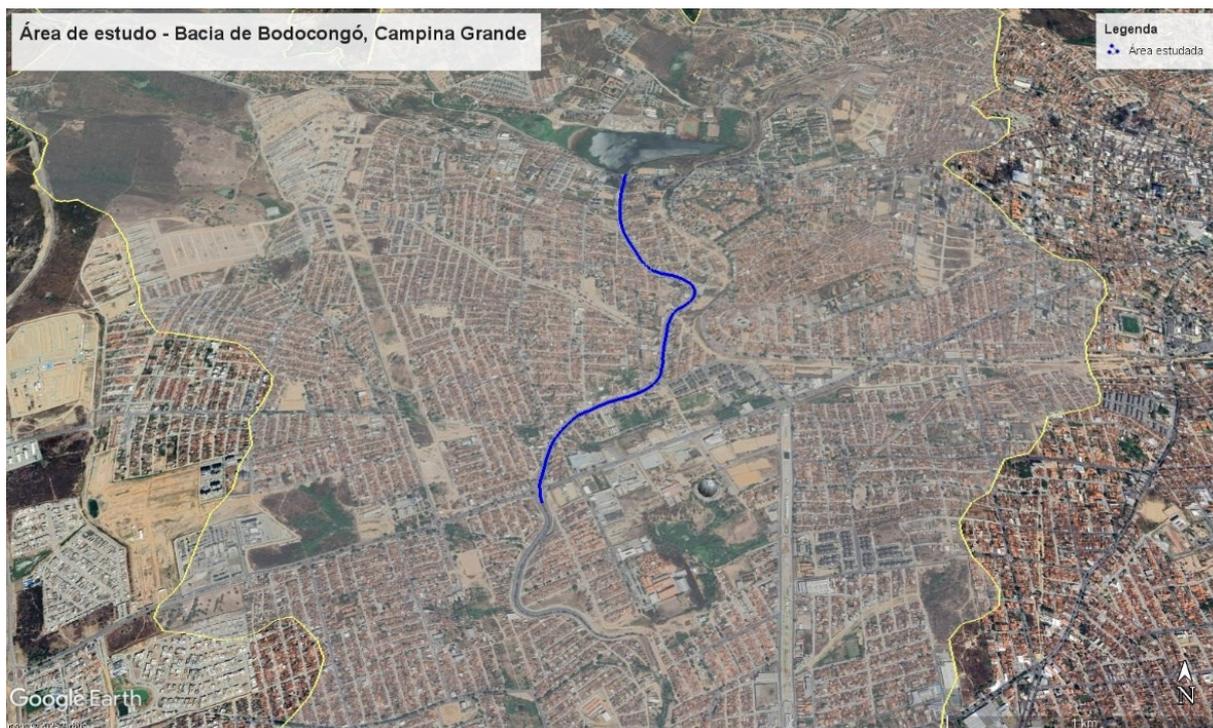
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

## 4.2 Delimitação da área em estudo

No presente estudo, delimitou-se um setor específico da Bacia Hidrográfica de Bodocongó, considerando critérios como disponibilidade de dados hidrológicos, relevância ambiental e estudos prévios que fornecem suporte técnico.

A delimitação foi realizada no ambiente do *software* QGIS, com o apoio de dados altimétricos obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE). A interpretação do relevo e da rede de drenagem, juntamente com a elaboração do mapa de declividade da bacia, possibilitou a identificação das áreas com maior potencial de escoamento superficial e vulnerabilidade a processos erosivos.

A Figura 10 apresenta a área definida para a pesquisa, a qual abrange um trecho da bacia com maior disponibilidade de informações hidrológicas, como séries históricas de precipitação e vazão. Além disso, a região encontra-se inserida no perímetro urbano de Campina Grande, onde há predominância de áreas impermeabilizadas e histórico de eventos recorrentes de alagamento, o que reforça sua vulnerabilidade a inundações e a importância do seu monitoramento.

**Figura 10 – Representação da área estudada**

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Complementando a análise espacial, foi realizada uma visita de campo ao canal, apresentada na Figura 11 e Figura 12, que possibilitou a observação direta das condições físicas da área, da estrutura da calha e da ocupação do entorno. Essa etapa contribuiu para validar a escolha do trecho, confirmando sua relevância para os objetivos da pesquisa e para o planejamento de medidas de controle e mitigação de inundações.

**Figura 11 - Vertedouro do Açude**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 12 - Estrutura da calha**



Fonte: Autor, 2025.

#### **4.2.1 Características do canal**

A área delimitada para estudo compreende um trecho de 2.590 metros do Canal de Bodocongó, visto que a partir desse a sessão do canal passava a ser retangular, estendendo-se desde a região do sumidouro do açude (latitude: -7.216228 e longitude: -35.916643) até um ponto localizado a jusante da ponte da Avenida Floriano Peixoto (latitude: -7.236716 e longitude: -35.919882). O canal possui uma seção trapezoidal, com uma base de 7,00 metros de largura e taludes inclinados em

1V:1H. A altura varia ao longo do trecho analisado, sendo de 3,50 metros nos primeiros segmentos e de 2,80 metros no restante do percurso (Figura 13).

**Figura 13** - Dimensão da seção trapezoidal do canal



Fonte: Adaptado de Lucena (2000).

A estrutura foi construída em concreto ciclópico, com coeficiente de Manning  $n = 0,016$ , apresentando espessura mínima de 0,40 metros nos taludes e 0,30 metros no fundo do canal (Lucena, 2000).

Além disso, as vias laterais do canal possuem uma largura total de 17,25 metros (Figura 14), distribuídas entre calçadas, acostamentos, pistas de rolamento e ciclovia, contribuindo para a mobilidade e infraestrutura urbana da região, no qual há 1,15m de calçada separando o canal da pista; 7,00m de pista subdividida em duas faixas; 2,50m de acostamento; 0,50m de calçada separando o acostamento da ciclovia; 2,50m de ciclovia e 3,60m de calçada.

**Figura 14** - Vias laterais do Canal de Bodocongó



Fonte: Adaptado de Lucena (2000).

Com base nas características estruturais descritas, foram realizadas simulações hidrodinâmicas no *software* HEC-RAS, com o objetivo de avaliar o comportamento do canal diante de diferentes cenários de ocupação do solo.

A simulação possibilitou a geração de manchas de inundação, permitindo a comparação entre as condições atuais e projeções futuras, considerando o avanço da urbanização e o conseqüente aumento da impermeabilização da bacia.

As simulações permitiram identificar pontos críticos de extravasamento, avaliar a capacidade hidráulica do canal e embasar propostas de medidas mitigadoras para reduzir os impactos de eventos extremos de precipitação.

### **4.3 Declividade do terreno**

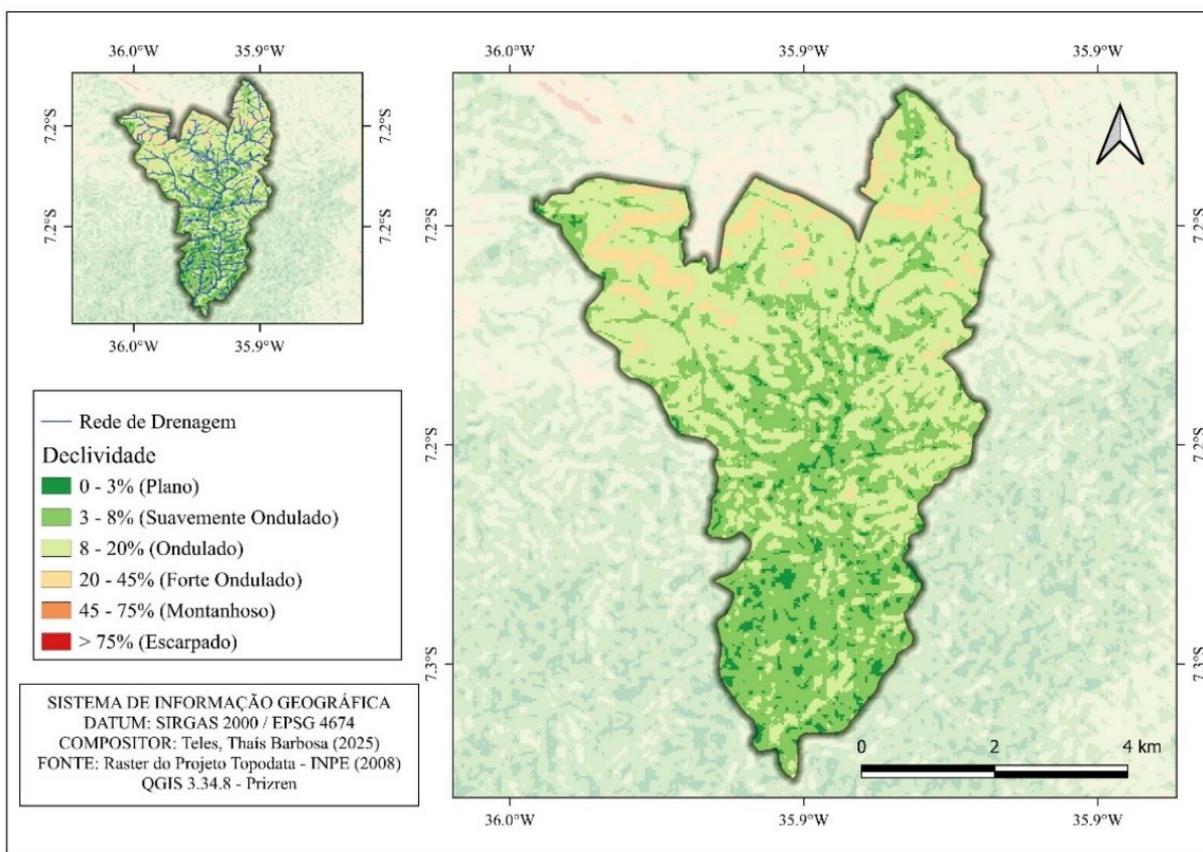
Para a análise da bacia estudada, foi gerado um mapa de declividade utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) do município de Campina Grande, disponível pelo TOPODATA. A declividade do terreno é um parâmetro essencial para compreender a dinâmica do escoamento superficial, pois afeta diretamente a velocidade da água e o tempo de concentração ( $T_c$ ) nos cursos d'água.

Em áreas com maior declividade, o escoamento é mais rápido, reduzindo o  $T_c$  e aumentando o risco de picos de enchente, pois a água atinge os rios e córregos mais rapidamente. Por outro lado, em áreas com menor declividade, especialmente em zonas urbanizadas, o risco de inundações é maior (Cury et al. 2021). A impermeabilização do solo, causada por asfaltos e construções, diminui a infiltração da água, favorecendo o acúmulo superficial e o transbordamento dos sistemas de drenagem.

O mapa de declividade gerado a partir do MDE permitiu uma visualização detalhada das características da bacia, que variam de áreas de relevo plano (0-3%) a setores de relevo escarpado (>75%). Para classificar as classes de declividade da bacia, foi adotada a proposta da EMBRAPA (1999).

A área estudada apresenta declividades inferiores a 40%, no entanto, devido à urbanização, essas regiões são mais propensas a alagamentos, o que reforça a necessidade de medidas adequadas de drenagem urbana. Áreas de maior altitude e declividade, geralmente estão menos suscetíveis à inundação, conforme ilustrado na Figura 15.

**Figura 15 - Mapa de declividade da Bacia de Bodocongó no perímetro urbano**



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### 4.4 Características Climáticas

De acordo com a classificação climática realizada por Köppen (1936), em que são levadas em consideração as variações sazonais e os valores médios mensais e anuais de temperatura e precipitação. A cidade de Campina Grande – PB possui o clima classificado como do tipo As', quente e úmido com chuvas de inverno e outono (Silva; Almeida, 2012).

Por meio de uma série de dados meteorológicos mensais obtidos no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na estação 82795 em Campina Grande, do ano de 1995 até o ano de 2024, contabilizando um período de 30 anos, foi analisado a média anual dos 30 anos, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo anual, apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Média pluviométrica do Município de Campina Grande-PB num período de 30 anos, de 1995 a 2024

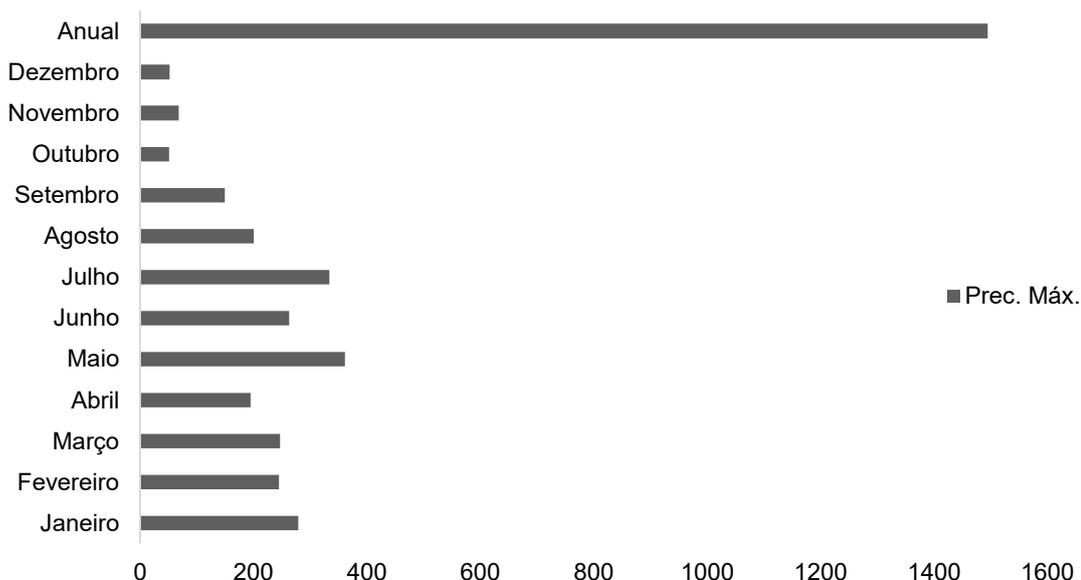
MESES	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
<b>Precipitação Média (30 anos)</b>	47.8	63.7	90.9	91.4	101.5	122.5	109	63.8	30.1	12.5	14.1	17.3	764.6
<b>Mediana</b>	39.9	39.2	88.8	91.4	97.9	121.4	94.7	62.4	19.3	9.1	6.1	14.4	697.5
<b>Desvio padrão</b>	53.6	66.6	51.5	56.5	64.6	62.2	67.3	43.3	32.3	11.7	18.9	14.1	263.7

Fonte: Adaptado de INMET (2024).

A precipitação média anual, considerando os últimos 30 anos, foi de 764,6 mm. Já o desvio padrão, que indica a variabilidade das chuvas, apresentou os maiores valores nos meses de fevereiro, maio, junho e julho, todos superiores a 60 mm (Tabela 1). Isso sugere uma maior dispersão dos dados em relação à média, caracterizando um regime pluviométrico irregular ao longo desses meses.

A partir das maiores precipitações obtidas durante os 30 anos analisados (Figura 16), verifica-se que os meses de maio e julho foram os únicos com precipitação acima de 300 mm. Para média de precipitação superior a 200 mm/mês foi verificado que cinco meses tiveram precipitações com valores iguais ou superiores.

**Figura 16** - Pluviosidade mensal máxima num período de 1995 a 2024



Fonte: Adaptado de INMET (2024).

Por meio dos valores de precipitação, foi possível calcular a intensidade e assim elaborar o hidrograma de projeto.

#### 4.5 Simulação no HEC-RAS

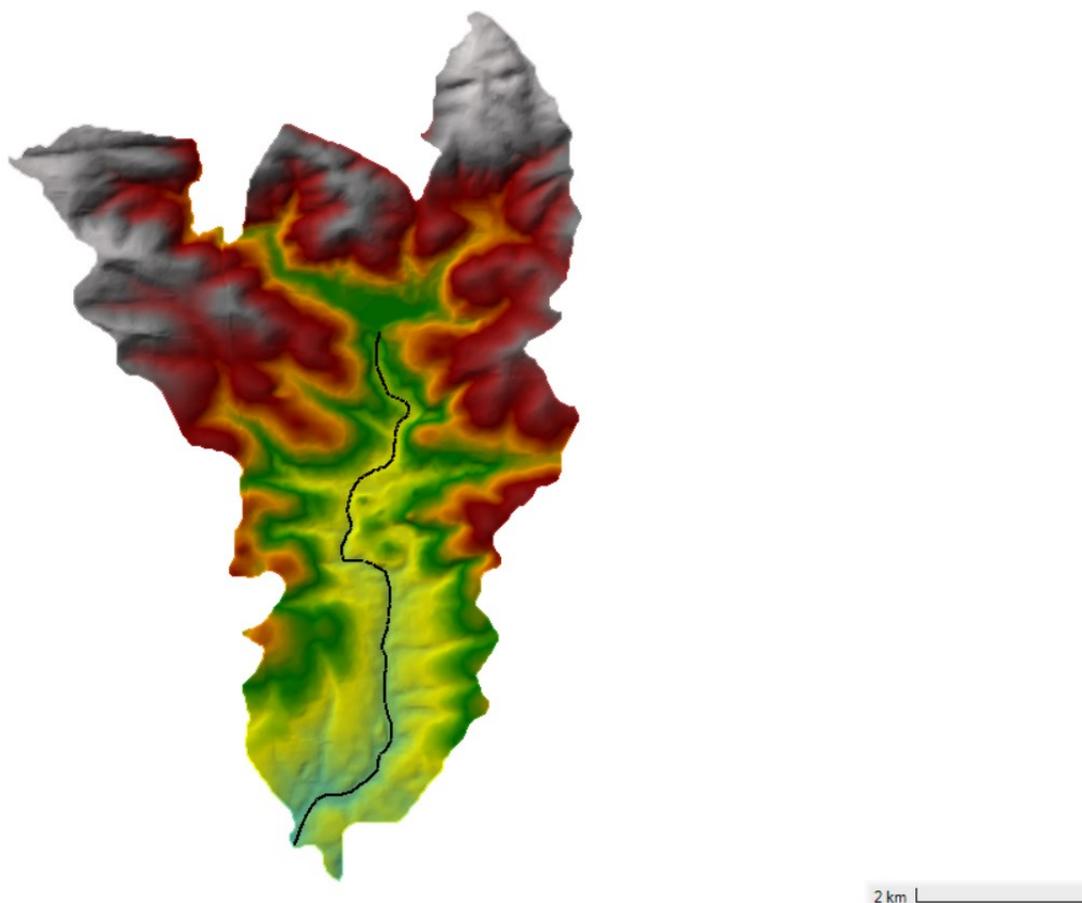
Para a realização da simulação, empregou-se o *software* HEC-RAS 2D para fluxo não permanente.

##### 4.5.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para o desenvolvimento do modelo hidráulico é necessária a inserção de um modelo de terreno que represente de forma adequada os dados observados em campo. Neste sentido, para elaboração do presente trabalho, foi considerado o Modelo Digital de Elevações (MDE) da Bacia de Bodocongó, mais precisamente o trecho urbano, disponibilizado pelo ANADEM.

O ANADEM é um Modelo Digital do Terreno (MDT) com remoção de viés causado pela vegetação no Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus GLO-30. Com resolução espacial de 30 metros e disponível para toda a América do Sul. A Figura 17 apresenta o MDE, no Ras Mapper, considerado para o estudo.

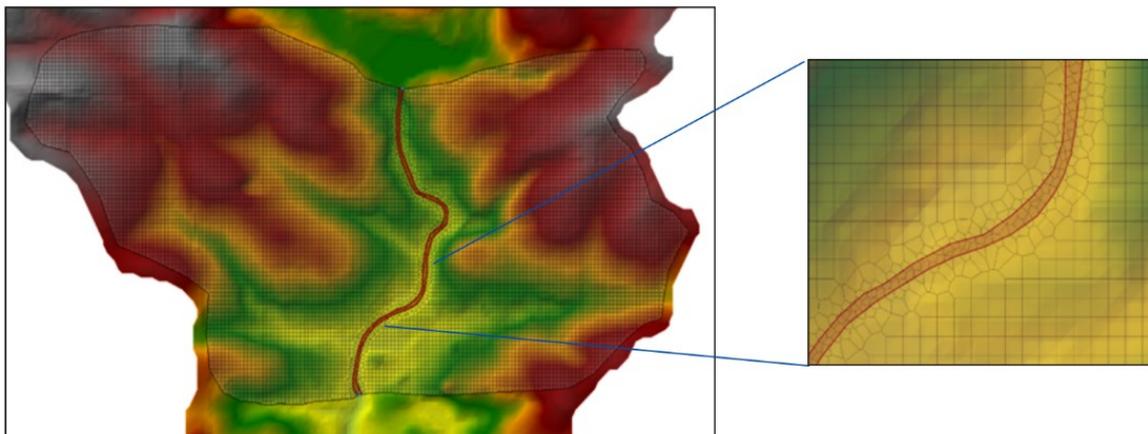
**Figura 17 – Modelo Digital de Elevação da área em estudo**



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### **4.5.2 Construção da Malha**

A malha representa a área onde o escoamento é simulado no modelo. Neste estudo, adotou-se um tamanho de célula de 30x30 metros, de forma arbitrária, para as regiões fora do curso d'água. Já na calha fluvial, foi aplicado um refinamento da malha por meio da função "*Refinement Regions*", utilizando espaçamento de 5 metros entre as células. A Figura 18 ilustra a malha utilizada na área em estudo.

**Figura 18 – Região da malha adotada**

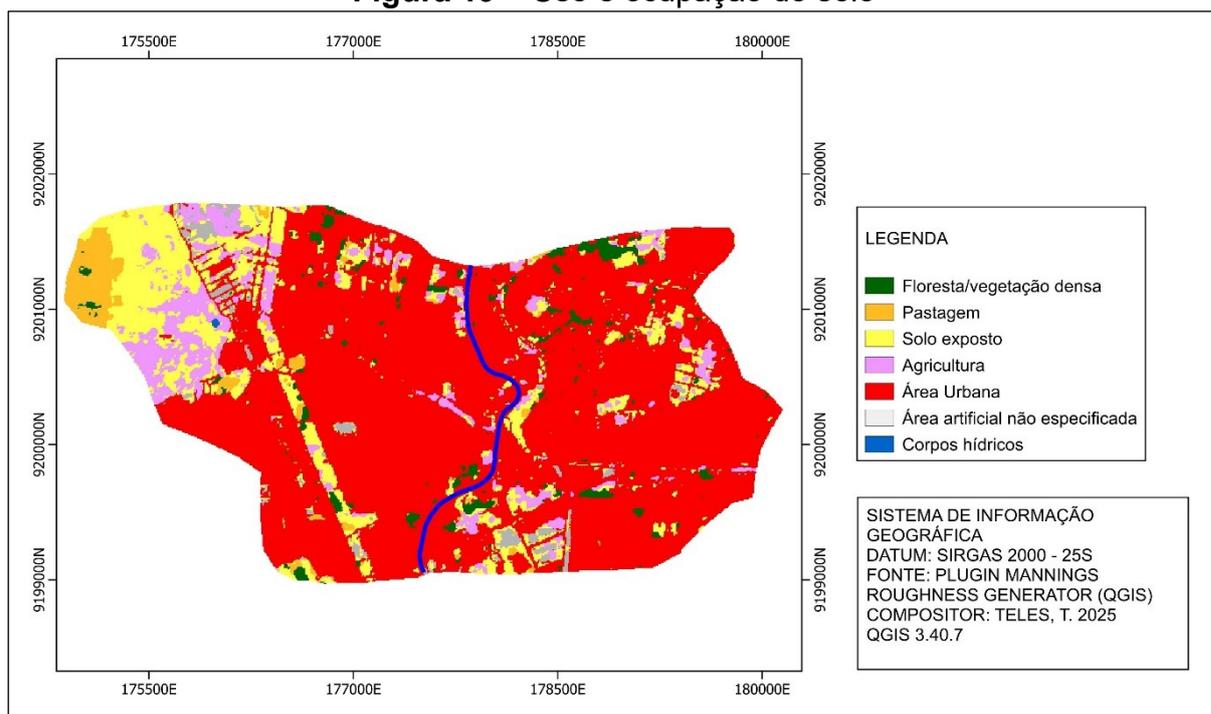
Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### **4.5.3 Coeficiente de Manning**

O coeficiente de *Manning* é um parâmetro que representa a rugosidade das superfícies onde ocorre o fluxo, influenciando diretamente as perdas de carga durante o escoamento. Como a extensão da área inundada pode alcançar regiões fora do canal, para uma simulação que se aproxime da realidade observada em campo é necessário não só definir o coeficiente de *Manning* para a calha, mas também o atribuir às áreas adjacentes à mesma.

Desta forma, para calibragem do modelo hidráulico no HEC-RAS utilizou-se o arquivo Uso e Ocupação do Solo, importado pelo QGis, em que a Figura 19 apresenta a classificação para a área de interesse.

**Figura 19 – Uso e ocupação do solo**



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

A partir da classificação de uso do solo para a região foram atribuídos valores de coeficiente de *Manning* para cada classe observada, de acordo com os recomendados pelo *plugin "Mannings Roughness Generator"*. A Tabela 2 apresenta os valores adotados para calibragem do modelo, estando dentro da faixa usualmente recomendadas por Chow (1959) para superfícies semelhantes.

**Tabela 2 – Valores de Manning adotados**

Uso e Ocupação do Solo	Coefficiente de Rugosidade de Manning
Floresta/vegetação densa	0,0940
Pastagem	0,0660
Solo exposto	0,0330
Agricultura	0,0350
Área Urbana	0,0180
Área artificial não especificada	0,0225
Corpos hídrico	0,0350

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

#### 4.5.4 Geração dos dados hidrológicos

A chuva de projeto foi gerada a partir da equação IDF (equação 1) obtida por Aragão et al. (2000), que usou uma série pluviométrica de 1966 a 1989 para determinar os parâmetros adimensionais locais.

$$I = \frac{334T^{0,227}}{(t+5)^{0,596}} \quad (1)$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

t = duração da chuva (minutos).

Para a construção do hidrograma de cheia, primeiramente são definidos os parâmetros essenciais do modelo, entre eles a vazão de pico e o tempo de ocorrência do pico, ambos obtidos a partir dos resultados hidrológicos do trabalho de Tsuyuguchi (2015), para a bacia do Rio de Bodocongó, para os diferentes tempos de retorno analisados (25, 50 e 100 anos).

Em seguida, estabelece-se o intervalo de tempo desejado para a geração dos dados, recomendando-se utilizar um passo regular de 10 minutos para garantir maior resolução e detalhamento do hidrograma.

Com esses valores, aplicou-se a função Gaussian-like para cada instante de tempo, segundo a expressão 2:

$$Q = Q_p * e^{-\frac{(t-t_p)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Onde,

Q(t) = Vazão

Q<sub>p</sub> = Vazão de pico, a máxima obtida para o tempo de retorno analisado (m<sup>3</sup>/s)

t<sub>p</sub> = tempo de ocorrência do pico (em minutos ou segundos, conforme unidade utilizada no eixo de tempo)

$\sigma$  = Largura do pico (desvio padrão), parâmetro que controla a largura da curva, ou seja, determina a dispersão do hidrograma em torno do pico, ajustável para que o hidrograma tenha duração e volume coerentes com a bacia estudada, adotamos o desvio de 10m.

Dessa forma, calculou-se a vazão correspondente a cada instante de tempo dentro do período analisado, desde o início da cheia até um tempo suficiente após o pico para garantir o retorno à condição de base. Por fim, os resultados obtidos compõem uma série temporal que representa o hidrograma sintético para cada cenário de tempo de retorno, permitindo a análise da resposta hidrológica da bacia sob diferentes condições extremas de precipitação.

Para o tempo de concentração, adotou-se o valor de 10 minutos. Essa escolha está em consonância com as características típicas de bacias urbanas de pequeno porte, onde a rápida condução do escoamento superficial, intensificada pela impermeabilização e pela presença de calhas e sarjetas, reduz significativamente o tempo necessário para que toda a área contribua com vazões no ponto de controle.

Segundo Chow, Maidment e Mays (1994), em áreas urbanizadas pequenas, o tempo de concentração tende a ser inferior a 15 minutos, sendo comum a adoção de valores da ordem de 10 minutos. Essa abordagem também é corroborada por estudos aplicados em contextos brasileiros, como o de Queiroz e Alves (2020), que demonstraram a adequação desse intervalo de tempo para a modelagem hidrológica urbana.

Em relação ao tempo de retorno, foram considerados os cenários de 25, 50 e 100 anos. A escolha desses intervalos se justifica também a partir da literatura técnica, conforme descrito por Tucci (1993) e apresentado pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA, 2005).

De acordo com esses autores, o dimensionamento de sistemas de drenagem deve considerar a frequência de ocorrência dos eventos extremos com base em critérios técnicos e econômicos, variando conforme o tipo de sistema (micro ou macrodrenagem) e o uso e ocupação do solo.

Para sistemas de macrodrenagem e zonas ribeirinhas, por exemplo, são indicados tempos de retorno mais elevados, que podem atingir 100 anos. Já para áreas urbanas com uso comercial ou residencial, são usualmente considerados tempos entre 2 e 10 anos.

Dessa forma, ao adotar múltiplos tempos de retorno, o estudo garante uma avaliação mais abrangente da resposta hidrológica da bacia, considerando cenários de menor e maior criticidade. Assim, o conjunto de decisões adotadas está alinhado com as diretrizes técnicas, características físicas da bacia e referências bibliográficas consolidadas, garantindo maior consistência e realismo aos resultados obtidos.

#### **4.5.5 Parâmetros de entrada para a simulação**

Na etapa de configuração do modelo hidrodinâmico no HEC-RAS 2D, foram inseridas as condições de contorno necessárias para representar o escoamento ao longo do canal. Na parte final do canal (jusante), foram definidos os valores de altura da lâmina d'água, representando o nível da água no ponto de saída. Essa informação é importante para simular o controle do nível na extremidade do sistema.

Na entrada do canal (montante), logo após a saída do açude, foi inserida uma condição de vazão do tipo hidrograma, por meio da opção "*Flow Hydrograph*". O hidrograma foi configurado com intervalo de 10 minutos, abrangendo o período entre as 24:00 horas do dia 30 de abril e a meia-noite do dia 1º de maio de 2025.

Também foi definida a condição inicial do modelo, acessando a aba "*Initial Conditions*" na janela de fluxo não permanente ("*Unsteady Flow Data*"). Para isso, foi atribuído um valor inicial de elevação de 0,001 metro na área de armazenamento. Esse valor mínimo ajuda a evitar erros no início da simulação, permitindo que o modelo se estabilize durante o tempo de aquecimento ("*warmup*").

Com essas configurações prontas, foi realizada a simulação do escoamento não permanente no HEC-RAS 2D, iniciando às 00:00 do dia 1º de maio de 2025 e finalizando às 24:00 do mesmo dia. O intervalo de tempo utilizado foi de 10 minutos, compatível com os dados do hidrograma de cheia. Os resultados obtidos permitiram observar o comportamento do escoamento superficial na área estudada, considerando a contribuição do açude e o deslocamento da água ao longo do canal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Modelagem Hidrológica

A simulação do comportamento hidrológico da Bacia de Bodocongó e da capacidade hidráulica do canal de drenagem foi realizada por meio da modelagem hidrológica e hidráulica, utilizando o pacote HEC. A modelagem hidrológica foi feita de forma indireta, a partir da adoção de vazões de pico obtidas nos estudos de Tsuyuguchi.

Com base nesses valores, foi possível construir um hidrograma que representa o escoamento superficial originado no açude em resposta ao evento de precipitação considerado.

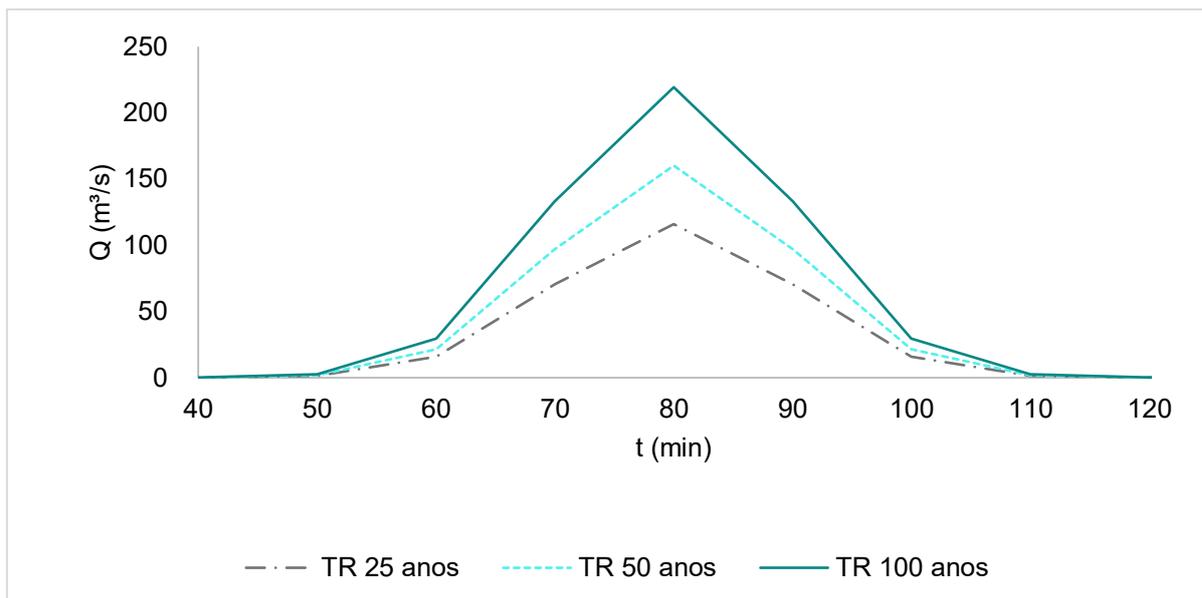
Posteriormente, definiram-se os parâmetros necessários para a simulação, considerando diferentes eventos de projeto, com tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, tempo escolhidos, pois para Tr menores já é sabido por outros estudos na bacia que a estrutura tem desempenho satisfatório (Santos, 2021 e Tsuyuguchi, 2015).

Para cada um desses cenários, foram gerados hidrogramas específicos. A Figura 20 ilustra o hidrograma inserido como condição de contorno no modelo na bacia de entrada no canal de Bodocongó, indicando os valores máximos de vazão utilizados nas simulações.

**Figura 20 - Hidrograma com vazões máximas**

**Vazão máxima na entrada do canal**

<b>TR 25 anos</b>	<b>TR 50 anos</b>	<b>TR 100 anos</b>
116,0	160,2	219,4



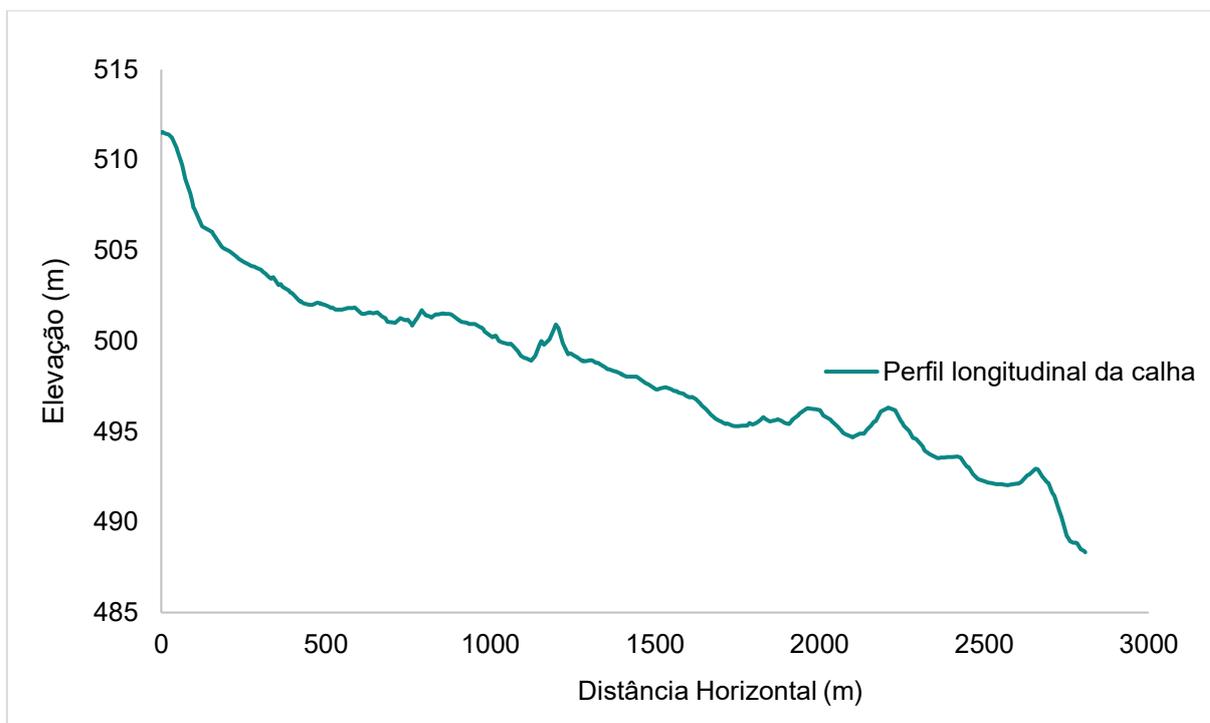
Fonte: Adaptado de Tsuyuguchi (2015).

Conforme esperado, observa-se na Figura 20 o aumento do TR resulta em maiores vazões de pico. O tempo até a ocorrência da vazão máxima permanece semelhante entre os cenários, concentrando-se por volta dos 80 minutos após o início do evento, o que indica um padrão de resposta hidrológica relativamente consistente da bacia conforme constatado por Rodrigues e Blanco (2018).

A forma dos hidrogramas, com uma elevação acentuada da vazão até o pico, seguida de uma recessão igualmente rápida, característica de bacias tipicamente urbanizadas ou com áreas impermeabilizadas, que favorecem a concentração rápida do escoamento. Esses dados foram essenciais para subsidiar a modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS 2D, uma vez que definem as condições de contorno de entrada do sistema, influenciando diretamente na simulação dos níveis de inundação e na avaliação da capacidade hidráulica do canal.

## 5.2 Modelo Hidráulico

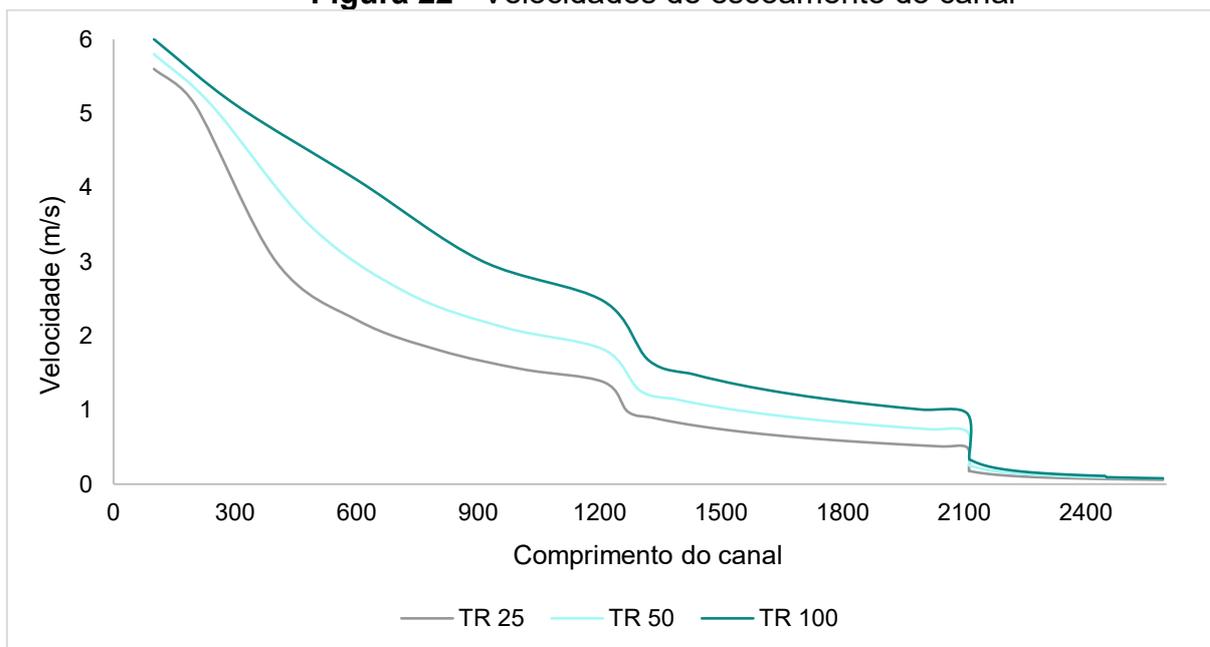
Com base nos dados topográficos utilizados na modelagem hidrodinâmica, foi traçada uma *breakline* (linha) ao longo do eixo central do canal, Figura 21, a fim de representar o perfil longitudinal da calha hidráulica. Essa linha representa o eixo principal de escoamento e permite a visualização da variação altimétrica ao longo do canal, evidenciando as diferenças topográficas do fundo da calha hidráulica.

**Figura 21 - Perfil longitudinal do canal**

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Ressalta-se que o perfil identificado na figura 21 não corresponde à topografia de toda a área modelada, mas sim à elevação do terreno especificamente no trecho central do canal, por onde se concentra o fluxo principal. A análise desse perfil é essencial para a compreensão do comportamento hidráulico do escoamento, uma vez que influencia diretamente na velocidade, profundidade e capacidade de transporte da vazão ao longo do canal.

A partir da análise da velocidade ao longo da calha do canal, observou-se que os resultados apresentaram comportamento compatível com a dinâmica esperada do escoamento superficial. Verifica-se esse comportamento na Figura 22, em que as velocidades para tempo de retorno de 100 anos são mais elevadas do que os demais TRs.

**Figura 22 - Velocidades de escoamento do canal**

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2025.

Este comportamento é constatado em diversos estudos, nos quais a velocidade do escoamento superficial em canais tende a aumentar com o incremento das vazões de pico associadas a maiores tempos de retorno, fenômeno este previsto teoricamente e observado nos resultados obtidos (Santos et al. 2017; Porto, R.L.L. e Tucci, C.E.M. 2010).

Tais simulações foram realizadas desconsiderando a presença de degraus do canal, em virtude da impossibilidade de realização de levantamento de campo e da indisponibilidade do projeto executivo. Tais estruturas são comumente empregadas em canais para a dissipação da energia do escoamento e a redução da declividade. Contudo, é fundamental considerar a necessidade de manutenção regular, especialmente quanto à remoção de detritos, a fim de evitar o assoreamento e garantir a eficiência hidráulica do sistema.

A simulação possibilitou a geração de manchas de inundação, permitindo a comparação entre as condições atuais e projeções futuras, considerando o avanço da urbanização e o conseqüente aumento da impermeabilização da bacia. Permitindo identificar pontos críticos de extravasamento, avaliar a capacidade hidráulica do canal e embasar propostas de medidas mitigadoras para reduzir os impactos de eventos extremos de precipitação.

### 5.3 Mapeamento de áreas inundáveis

A partir do modelo hidráulico foram obtidas as áreas inundáveis da Bacia de Bodocongó pelas vazões geradas pelos eventos associados aos tempos de retornos de 25, 50 e 100 anos. A Figura 23a, 23b e 23c apresentam as manchas de inundação resultantes do estudo.

**Figura 23** – Espacialização da Áreas Inundáveis



Fonte: Elaborada pelo autor, 2025

As figuras geradas demonstram que, desde o início até o final do canal analisado, diversas edificações ribeirinhas estão situadas em zonas potencialmente alagáveis, evidenciando a vulnerabilidade de ocupações humanas próximas ao leito do curso d'água.

A análise das manchas de alagamento para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos revelou comportamentos muito semelhantes, tanto em extensão quanto em distribuição espacial. Esse resultado possui amparo na literatura técnica, que destaca que a expansão da mancha de alagamento em eventos de maior TR depende fortemente das características da bacia e do sistema de drenagem, podendo, em muitos casos, manter-se quase constante entre cenários próximos, com diferença apenas na profundidade da lâmina d'água (TUCCI, 2009; Carvalho; Pinho, 2011; Porto; Tucci, 2010).

O observado para a chuva com TR de 25 anos, a área foi de aproximadamente 3.067.421,74 m<sup>2</sup>. Já para 50 e 100 anos, os valores chegaram a 3.187.236,21 m<sup>2</sup> e 3.321.501,65 m<sup>2</sup>, respectivamente. Isso confirma a tendência de que eventos mais intensos resultam em maior volume de água escoada e, conseqüentemente, em uma maior área atingida pela inundação. Assim, o cenário de 25 anos apresentou, em alguns pontos, uma mancha mais espalhada lateralmente. Esse comportamento pode ser explicado por fatores como a velocidade do escoamento, o tempo de concentração e as características do ambiente urbano, que influenciam diretamente como a água se acumula e se desloca pela superfície.

A Tabela 3, apresenta as coordenadas das áreas inundadas para os 10 pontos selecionados aleatoriamente, demonstrados na Figura 24, para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos.

**Tabela 3:** Coordenadas geográficas para os TRs de 25, 50 e 100 anos

TR (anos) Pontos	25 anos		50 anos		100 anos	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
1	-7.217200°	-35.917962°	-7.217200°	-35.917962°	-7.219355°	-35.912194°
2	-7.222811°	-35.921142°	-7.222634°	-35.911748°	-7.227654°	-35.921648°
3	-7.222912°	-35.909606°	-7.222451°	-35.909347°	-7.219355°	-35.912194°
4	-7.226517°	-35.919812°	-7.222634°	-35.911748°	-7.225728°	-35.915770°
5	-7.227816°	-35.911821°	-7.224088°	-35.909584°	-7.225728°	-35.915770°
6	-7.224861°	-35.930278°	-7.226654°	-35.924884°	-7.227654°	-35.921648°
7	-7.227323°	-35.918459°	-7.227936°	-35.901746°	-7.232894°	-35.903972°
8	-7.231354°	-35.928909°	-7.226654°	-35.924884°	-7.227654°	-35.921648°
9	-7.231354°	-35.928909°	-7.231641°	-35.922434°	-7.227654°	-35.921648°
10	-7.234604°	-35.911910°	-7.232111°	-35.909730°	-7.234978°	-35.916791°

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

**Figura 24:** Pontos selecionados para TRs 25, 50 e 100 anos

Fonte: Elaborada pelo autor, 2025.

Ainda, em relação a espacialização das áreas inundáveis, essa fundamentação também é defendida em outros estudos, segundo Tucci (2009), Porto e Tucci (2010) e Carvalho e Pinho (2011) afirmaram que a extensão lateral da mancha de inundação é influenciada tanto pela velocidade e volume do escoamento quanto pelas condições locais do ambiente urbano, como a microtopografia, a presença de obstáculos e a capacidade limitada do sistema de drenagem.

Assim, em eventos de menor intensidade, a água pode permanecer mais tempo acumulada em determinadas áreas, favorecendo o espalhamento lateral da inundação, mesmo sem aumento significativo da profundidade da lâmina d'água.

Além disso, é importante considerar que esses cenários simulados podem acontecer mesmo em chuvas menos intensas. O açude Bodocongó localizado a montante do canal vem perdendo capacidade de armazenamento com o passar do tempo, devido ao assoreamento e à ocupação desordenada no entorno.

Como não há um estudo batimétrico atualizado, não se sabe ao certo quanto dessa capacidade já foi comprometida. No entanto, sabe-se que, com menos volume disponível para retenção, o açude libera mais água para jusante mesmo em chuvas moderadas.

No contexto semiárido, a redução do volume útil dos açudes por assoreamento e ocupação desordenada compromete significativamente sua capacidade de regularização e amortecimento de cheias. Como resultado, a frequência e a intensidade de inundações a jusante podem aumentar, mesmo para chuvas de menor intensidade, ampliando a vulnerabilidade das áreas urbanas (Medeiros et al., 2011; GALVÍNCIO et al., 2006; ANA, 2015).

Cirilo et al., 2003, destacam ainda que a baixa capacidade de infiltração e a variabilidade das chuvas intensificam o risco de inundações. Por isso, recomenda-se o manejo adequado da bacia e ações de conservação do solo e das margens dos reservatórios.

Isso significa que, no futuro, eventos simulados para tempos de retorno maiores podem ocorrer com chuvas menos intensas, tornando a área ainda mais vulnerável a inundações. Por isso, reforça-se a importância de medidas de preservação e manejo da bacia, tanto na parte a montante quanto na área urbana, como forma de evitar o agravamento dessas ocorrências.

A simulação mostrou que as regiões mais afetadas se concentram em áreas com predominância de vegetação densa e solo exposto, embora parte significativa da mancha de inundação atinja áreas urbanizadas.

Áreas críticas, historicamente afetadas, devem ser reavaliadas quanto à viabilidade de realocação de moradores, visando a mitigação de riscos humanos e materiais. Além disso, zonas mapeadas como inundáveis devem ser tratadas como inaptas à expansão urbana, de modo a evitar o agravamento do cenário de vulnerabilidade socioambiental.

Ressalta-se que o modelo foi alimentado a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), que apresenta limitações em relação à precisão altimétrica, especialmente na representação da calha fluvial. Dessa forma, os resultados podem ser considerados conservadores em alguns trechos, pois o MDE pode ter representado a cota da lâmina d'água no momento do levantamento, e não necessariamente o fundo do canal.

Nesse contexto, os produtos gerados por meio da simulação hidrodinâmica podem servir como subsídio relevante para o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos. A incorporação dos mapas de inundação em ações de prevenção e resposta a desastres, especialmente por órgãos como a Defesa Civil municipal, é fundamental. Com base nessas informações, é possível delimitar zonas de risco, elaborar planos de contingência, orientar a ocupação do solo e emitir alertas à população em eventos extremos, contribuindo para uma gestão mais eficiente e integrada do território urbano.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada por meio da modelagem hidráulica evidenciou que eventos extremos, cuja vazão supera aquela associada a partir do tempo de retorno de 25 anos, podem ocasionar o transbordamento da calha do canal estudado. Tal constatação, aliada à intensificação dos episódios de chuva na região, indica um cenário preocupante, caracterizado pelo aumento da frequência e da severidade de desastres naturais relacionados a inundações.

Diante disso, torna-se imprescindível a atuação do poder público na gestão preventiva desses eventos. Os mapas de inundação elaborados neste estudo indicam áreas críticas onde residem populações expostas a riscos significativos, exigindo ações emergenciais e estratégicas. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a dinâmica esperada para o regime de escoamento superficial não permanente ao longo do canal, sendo confirmados também pela análise das velocidades máximas simuladas, que explicam o comportamento diferenciado das manchas de inundação nos distintos cenários.

Reconhece-se, contudo, a limitação decorrente da ausência de dados que possibilitassem uma calibração e validação mais rigorosas dos modelos. Nesse sentido, destaca-se a necessidade urgente de instalação de instrumentos de monitoramento, como pluviômetros e medidores de vazão, visando aprimorar futuras análises. Ainda assim, a base de dados utilizada, as simulações realizadas e os resultados obtidos — em consonância com observações pré-existentes — constituem um importante aporte técnico para elaboração de trabalhos futuros.

Com base na identificação das áreas de risco, destacam-se as seguintes ações que podem ser implementadas, isoladamente ou em conjunto, conforme as especificidades locais e a viabilidade técnica de cada proposta:

- Desenvolver planos operacionais de emergência voltados à prevenção e resposta rápida em situações de risco iminente, com participação da comunidade e dos órgãos competentes;
- Reassentar gradualmente famílias em áreas de alta vulnerabilidade, garantindo infraestrutura adequada e condições dignas nos locais de destino;
- Atualizar o Plano Diretor Municipal, incorporando critérios de restrição à ocupação em zonas sujeitas a inundações e promovendo a preservação de áreas ambientalmente sensíveis;

- Adotar soluções baseadas na natureza para a drenagem urbana, como bacias de infiltração, trincheiras percoladoras e pavimentos permeáveis, a fim de aumentar a retenção e a infiltração da água pluvial;
- Implantar estruturas hidráulicas complementares, como canais de extravasão e reservatórios de contenção, que funcionem como suporte ao sistema principal em períodos de cheia.

A continuidade e o aprofundamento desses estudos são fundamentais para aprimorar os modelos e contribuir com uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos, promovendo maior segurança para as populações vulneráveis.

Principalmente no comportamento de retenção do açude de Bodocongó, ou seja, recomendamos linhas de pesquisa futuras, como a necessidade de um estudo batimétrico do açude, monitoramento contínuo da mancha de inundação, ou o uso de outros modelos hidrodinâmicos para validação cruzada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019. 112 p. ISBN 978-85-8210-059-2.

AMARAL, Rosângela do; SANTORO, Jair; TOMINAGA, Lídia Keiko. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

ANDJELKOVIC, Ivan. **Guidelines on non-structural measures in urban flood management**. International Hydrological Programme (IHP), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2001.

Antzoulatos, G.; Kouloglou, I.; Bakratsas, M. et al. Flood Hazard and Risk Mapping by Applying an Explainable Machine Learning Framework Using Satellite Imagery and GIS Data. **Sustainability** 2022, 14, 3251.

ARAÚJO, Caline Mendes de. **“Áreas de risco” e problemáticas socioambientais: uma reflexão sobre a produção e apropriação do espaço urbano em Campina Grande (PB)**. 2019. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ARAÚJO, Luttemberg Ferreira; CIRILO, José Almir; SILVA, Josielly Braz; OLIVEIRA, Dênia Santos. Aplicação da Modelagem Hidrológica na Gestão dos Recursos Hídricos: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 3095–3108, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.4.p3084-3098.

ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S.; GOIS, R. S. S. Chuvas intensas no Estado da Paraíba. In: V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2000, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABRH, 2000. p.74-85.

ASSIS, Marina da Silva Reis. **Modelagem de escoamento permanente e uniforme do rio Itabirito usando o HEC-RAS**. 2024. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na Bacia do Rio Mamanguape - PB**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BARBOSA, P. I. G. **Modelagem hidráulica com base em dois modelos hidrológicos como subsídio à predição de eventos de cheias na bacia do rio Jucu Braço Sul/ES**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. **Diário Oficial da União**: Brasília, 2012.

BRASIL. Ministério das Cidades. Relatório de Avaliação Anual do Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB 2021. **Ministério das Cidades**: Brasília, 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Mitigar ou adaptar? O que protege o Brasil das mudanças climáticas. Brasília: MDR, mai. 2025 Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/mitigar-ou-adaptar-o-que-protege-o-brasil-das-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRITO, Â. S. **Impactos ambientais urbanos na Vila dos Teimosos**: Médio Curso do Riacho Bodocongó, Campina Grande-PB. 2011. Monografia (Especialização em Geoambiência e Recursos Hídricos do Semiárido) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.

BRUNNER, Gary W. **HEC-RAS river analysis system**: hydraulic reference manual. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2010.

BUFFO, Maurício Marcuz. **Drenagem urbana sustentável**: avaliação do emprego de técnicas compensatórias em bacia urbanizada. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

CAMPOS, Ana Flávia. **Simulação no software HEC-RAS da mancha de inundação do rio Itabirito na cidade de Itabirito - MG para diferentes períodos de retorno**. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia**. São Paulo, 2006. Cap. 03.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Hidrologia aplicada*. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

CHPW, V.T. Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1959

DAMAME, Desiree Baldin; LONGO, Regina Marcia; DE OLIVEIRA, Everton Dias. Impactos ambientais pelo uso e ocupação do solo em sub bacias hidrográficas de Campinas, São Paulo, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2019.

DESALEGN, H.; MULU, A. Mapping flood inundation areas using GIS and HEC-RAS model at Fetam River, Upper Abbay Basin, Ethiopia. **Scientific African**, v. 12, e00834, 2021.

DOMINGOS CURY, Marlon; LADWIG, Nilzo Ivo; DEBIASI MENEGASSO, Juliana; SUTIL, Thaise; DE CONTO, Danrlei. MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO COMO INFORMAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO TERRITORIAL EM BACIA HIDROGRÁFICA. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 22, n. 83, p. 160–175, 2021.

DU, J. et al. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 464–465, p. 127–139, set. 2012.

FELICIANO, F. C. S. **Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2022.

FERREIRA, A. de S. **Situação ambiental de um riacho canalizado em Campina Grande – PB**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2016.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99–108, out./dez. 2006.

HOYT, W. G.; LANGBEIN, W. B. **Floods**. Princeton: Princeton University Press, 1955. 469 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**: Campina Grande. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

LEITE, M. E.; DIAS, F. T.; ALMEIDA, J. W. L.; DOS SANTOS-NETO, N. F. Land use and environmental impacts: Flood model in a medium-sized Brazilian city as a tool for urban sustainability. **Environmental Science & Policy**, v. 151, 103613, 2024.

LUCENA, A. E. de F. L. **Construção do Canal de Bodocongó**. 2000. Relatório de Estágio (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000).

MADAKUMBURA, Gavin D. et al. Influência antropogênica na precipitação extrema em áreas terrestres globais observada em múltiplos conjuntos de dados observacionais. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 3944, 2021.

MARENGO, J. A. et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, v. 38, n. 112, p. 203–228, 2024.

MARCIANO, Alexandre Germano. **Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2019.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Water security for better lives**. Paris: OECD, 2013.

OLIVEIRA, Jonatan Teixeira. **Geoprocessamento aplicado ao estudo de identificação das zonas inundáveis no município de Belo Vale/MG**. 2013. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DE OLIVEIRA SENA, J. P. de; BESERRA LUCENA, D.; MOARES NETO, J. M. Eventos pluviiais intensos e seus impactos em Campina Grande-PB. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, p. 69–77, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 fev. 2025.

PEDROSO, F. T.; TYBUSH, J. S. Inundações, Desenvolvimentismo e Sustentabilidade Urbana: Uma Análise a Partir das Origens Naturais e Antrópicas dos Desastres Ambientais. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 7, n. 2, p. 19–38, 2021.

PMCG – PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINA GRANDE. Lei nº 3968/01 de 28 de novembro de 2001. Promove a revisão do Plano Diretor do Município de Campina Grande.

PMPA – PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. Manual de Drenagem Urbana. Plano Diretor de Drenagem Urbana. Departamento de Esgotos Pluviais. Volume VI. 2005.

PORTO, R.L.L.; TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010.

QUEIROZ, Matheus Silveira de; ALVES, Neliane de Sousa. Aplicação de diferentes fórmulas de tempo de concentração para uma bacia hidrográfica urbana. **Revista Tocantinense de Geografia**, [S. l.], v. 9, n. 18, p. 219–231, 2020.

RAMOS, C. Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. **Default Jornal**, 2013.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 57.646, de 30 de maio de 2024. Altera o Decreto nº 57.600, de 4 de maio de 2024, que reitera o estado de calamidade pública. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RODRIGUES, Renaly Maria da Silva. **Comunicação de risco e segurança hídrica urbana**: o caso da Vila dos Teimosos em Campina Grande - PB. 2021. 29f. (Trabalho de Conclusão de Curso - Artigo), Curso de Licenciatura em Geografia, Centro de Humanidades, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

RUFINO, I. A. A.; SANTOS, R. C.; TSUYUGUCHI, B. B. Estimativas de taxas de impermeabilização do solo nas bacias urbanas do município de Campina Grande-PB utilizando sensoriamento remoto. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais [...]**. João Pessoa: INPE, 2015. p. 6505–6510.

SANTOS, E.S.; SOUSA, L.F.; LIMA, K.C. Simulação hidrodinâmica de canais urbanos sob diferentes cenários de uso do solo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 1, p. 101-112, 2017.

SETTI, R. F.; HORA, M. de A. G. M. da; HORA, A. F. da. Medidas não convencionais de controle na fonte para minimização das enchentes em áreas urbanas. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 9, e6627, 2024.

SILVA, J. N. R.; ARAÚJO, S. M. S. Riscos e vulnerabilidades socioambientais decorrentes de eventos climáticos e geomorfológicos na cidade de Campina Grande-PB. **Revista Geosertões**, v. 5, n. 10, p. 257–276, 2020.

SILVA, T. A. **Modelagem hidráulica do canal do Rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS**. 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado

Profissional em Gestão de Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SILVA, V. P. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo do clima urbano na cidade de Campina Grande, PB. **Revista de Ciências da Vida**, v. 32, n. 1, p. 31–44, jan./jun. 2012.

SOARES, E. A. G.; SIQUEIRA, G. W. Sensoriamento remoto e geoprocessamento como ferramenta de prevenção de risco: mapeamento de áreas suscetíveis à inundação em Anajás-PA. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 8, e6102, 2024.

TSUYUGUCHI, Bárbara Barbosa. **Macro drenagem e ocupação do solo no município de Campina Grande**: caracterização, simulação e análises sistêmicas. 100f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2015

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

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. Drenagem urbana. Porto Alegre (RS). Editora da UFRGS, 1995. 428 p.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993

UNITED NATIONS. What is water security? Infographic. New York: UN, 08 mai. 2013.

UNRRD –United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2023. **Overview of Disasters in Latin America and the Caribbean 2000 -2022**. Disponível em: <<https://www.undrr.org/media/89900>>. Acessado em: 01 mai. 2025.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual. 2020.

VINHAL, C. P.; OLIVEIRA, M. S.; GIONGO, P. R. TC20 geoprocessamento aplicado ao estudo de risco a alagamento. **[Anais...]**. Quirinópolis: UEG Câmpus Sudoeste, v. 3, p. 367-375, 2023.

WESTEN, C. J. Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. **Treatise on Geomorphology**, v. 3, p. 259–298, 2013.