



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM GERAÇÃO DE  
MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO TAPACURÁ**

Recife  
2023

JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM GERAÇÃO DE  
MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO TAPACURÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Recife

2023

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

C512m Chaves, João Victor Bezerra.

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com geração de mapas de perigo de inundação na Bacia do Tapacurá. / João Victor Bezerra Chaves. – 2023.

117 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. HEC-HMS. 3. HEC-RAS. 4. Bacia do Rio Tapacurá.  
I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-216

JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA COM GERAÇÃO DE  
MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO TAPACURÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 26/07/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr.<sup>a</sup> Larissa Ferreira David Romão Batista (Examinadora Externa)  
Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento de Pernambuco

---

Prof. Dr. Diego Cezar dos Santos Araújo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus familiares, em especial à minha mãe, Mônica Leite Bezerra. Seu apoio constante, incentivo e amor incondicional foram fundamentais ao longo desta jornada acadêmica.

Em seguida, gostaria de agradecer à minha orientadora, Leidjane Maria Maciel de Oliveira, e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco. Sua orientação, conhecimentos e contribuições foram essenciais para o sucesso desta dissertação.

Também gostaria de estender meus agradecimentos aos meus colegas da TPF Engenharia. Sua colaboração, troca de ideias e apoio mútuo foram valiosos durante o processo de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

A todos que mencionei, minha mãe, minha orientadora, os professores do PPGEC da UFPE e meus colegas da TPF Engenharia, agradeço de coração por suas contribuições, apoio e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Seu envolvimento foi fundamental para o sucesso deste trabalho. Sou imensamente grato por cada um de vocês.

## RESUMO

A urbanização desenfreada e não planejada, aliado as projeções de mudanças climáticas, apontam para um cenário de maior vulnerabilidade de pessoas e infraestruturas às inundações urbanas. Nesse contexto inclui-se a cidade de Vitória de Santo Antão, na Zona da Mata do estado de Pernambuco, que cresceu no entorno do rio Tapacurá, ocupando sua planície de inundação. Essa cidade já sofreu com eventos catastróficos de inundações no passado, merecendo destaque os eventos de 2005, 2010 e 2011, com um número estimado de 3,26 milhões de pessoas afetadas, 162 óbitos e um custo da ordem de R\$13,52 milhões. O presente trabalho teve como objetivo realizar modelagem hidrológica e hidrodinâmica 2D com o auxílio de técnicas de Sensoriamento Remoto e modelo digital do terreno de alta resolução para geoespacializar a ocorrência de inundações e obter mapas com indicadores e índices de perigo para a sede urbana do município de Vitória do Santo Antão. O modelo digital do terreno foi obtido a partir de perfilamento a laser e disponibilizado pelo projeto Pernambuco Tridimensional. Os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos foram efetivados com os *softwares* de livre acesso HEC-HMS e HEC-RAS, respectivamente. A calibração e validação do modelo hidrológico foram executadas com dados de vazão disponíveis e foi simulado um evento real que aconteceu em maio de 2011, alcançando um coeficiente eficiência *Nash-Sutcliffe* de 0,940 para a calibração. As simulações conseguiram reproduzir com fidelidade a mancha de inundação ao longo do município, que se estendeu por 2,993 km<sup>2</sup> e apresentou lâminas d'água de até 5,65 m. Com os resultados da simulação foi possível a criação de mapas com indicadores e índices de perigo, analisando os mapas, é possível observar que 50,8% da área inundada apresenta uma classificação de perigo alto em relação a profundidade da água, sendo um risco definitivo para as pessoas, bens móveis e imóveis. Espera-se que as informações aqui produzidas possam contribuir com os órgãos gestores na tomada de decisão para a adoção de medidas estruturais e/ou não-estruturais para esse local possibilitando evitar ou mitigar os prejuízos monetários e de vidas associados a inundações.

Palavras-chave: HEC-HMS; HEC-RAS; Bacia do Rio Tapacurá.

## ABSTRACT

Uncontrolled and unplanned urbanization, combined with projections of climate change, point to a scenario of increased vulnerability of people and infrastructure to urban flooding. In this context, the city of Vitória de Santo Antão, in the Zona da Mata region of the state of Pernambuco, stands out. It has grown around the Tapacurá River, occupying its floodplain. This city has already suffered from catastrophic flood events in the past, with notable events occurring in 2005, 2010, and 2011, affecting an estimated 3.26 million people, resulting in 162 deaths, and causing costs in the order of R\$13.52 million. The aim of this study was to conduct 2D hydrological and hydrodynamic modeling using Remote Sensing techniques and a high-resolution digital terrain model to geospatially analyze the occurrence of floods and obtain maps with indicators and danger indexes for the urban center of Vitória de Santo Antão. The digital terrain model was obtained through laser profiling and made available by the Pernambuco Tridimensional project. The hydrological and hydrodynamic models were implemented using the freely accessible software HEC-HMS and HEC-RAS, respectively. The calibration and validation of the hydrological model were performed using available flow data, and a real event that occurred in May 2011 was simulated. The calibration achieved a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.940. The simulations successfully reproduced the flood extent throughout the municipality, covering an area of 2,993 km<sup>2</sup> and reaching water depths of up to 5.65 m. With the simulation results, it was possible to create maps with hazard indicators and indices. Analyzing the maps, it can be observed that 50.8% of the flooded area is classified as high danger concerning water depth, representing a definite risk to people, movable and immovable assets. It is expected that the information produced here can contribute to the decision-making process of the managing authorities, enabling the adoption of structural and/or non-structural measures for this location, thus helping to prevent or mitigate the financial and life losses associated with floods.

Keywords: HEC-HMS; HEC-RAS; Tapacurá River Basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ocorrências de desastres no mundo classificados por tipo. ....	19
Figura 2 – Perdas econômicas (em bilhões de dólares) por tipo de desastre. ....	19
Figura 3 – Inundação de 2005 em Vitória de Santo Antão. ....	21
Figura 4 – Inundação de 2010 em Vitória de Santo Antão. ....	22
Figura 5 – Inundação de 2011 em Vitória de Santo Antão. ....	23
Figura 6 – Mapa de perigo de inundação em Vitória de Santo Antão. ....	24
Figura 7 – Exemplo de bacia hidrográfica com cinco estações. ....	27
Figura 8 – Interface do HEC-HMS versão 4.10. ....	36
Figura 9 – Fluxo de trabalho para realizar uma simulação no HEC-HMS. ....	40
Figura 10 – Fluxograma para calibração do modelo no HEC-HMS. ....	42
Figura 11 – Classificação dos escoamentos em condutos livres. ....	45
Figura 12 – Interface gráfica principal do HEC-RAS 6.3.1. ....	48
Figura 13 – Fluxograma de trabalho HEC-RAS. ....	49
Figura 14 – Divisão do estado em quadrículas do mapeamento PE3D. ....	53
Figura 15 – Diagrama de perigo de inundação – profundidade x velocidade. ....	57
Figura 16 – Localização da Bacia do rio Tapacurá. ....	59
Figura 17 – Bacia do Rio Tapacurá em relação aos municípios pernambucanos. ....	60
Figura 18 – Perímetro urbano de Vitória de Santo Antão. ....	61
Figura 19 – Bairros de Vitória de Santo Antão. ....	63
Figura 20 – Fluxograma de atividades da dissertação. ....	64
Figura 21 – Estações pluviométricas na bacia do Tapacurá e em seu entorno. ....	66
Figura 22 – Complemento Hidroweb Downloader. ....	67
Figura 23 – Série histórica de precipitação média calculada para cada dia. ....	69
Figura 24 – Menu “GIS” do HEC-HMS. ....	70
Figura 25 – Complemento “CalcularS” do QGIS 2.18.9. ....	72
Figura 26 – Modelo de bacia configurado no HEC-HMS. ....	74
Figura 27 – Detalhe da malha de células utilizada na simulação hidrodinâmica. ....	75
Figura 28 – Sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Tapacurá. ....	78
Figura 29 – Hidrograma de cheia para o evento de maio de 2011 (calibração). ....	83
Figura 30 – Hidrograma de cheia para o evento de agosto de 2000 (validação). ....	83
Figura 31 – Hidrograma de cheia para o evento de junho de 2005 (validação). ....	84
Figura 32 – Hidrograma de cheia para o evento de junho de 2010 (validação). ....	84

Figura 33 – Hidrograma de cheia para o evento de julho de 2017 (validação). .....	85
Figura 34 – Hidrograma de cheia para o evento de maio de 2021 (validação). .....	85
Figura 35 – Hidrogramas gerados por sub-bacia no HEC-HMS, na bacia do Tapacurá, evento de maio/2011. ....	86
Figura 36 – Área atingida pela inundação do rio Tapacurá, evento de maio/2011. ..	89
Figura 37 – Inundação simulada na Ponte Jardim Ipiranga, evento de maio/2011. ...	90
Figura 38 – Inundação simulada próximo a Ponte do Amparo, evento de maio/2011. ....	91
Figura 39 – Inundação simulada entre as pontes de Gaiolas e do Galucho, evento de maio/2011. ....	92
Figura 40 – Profundidade máxima da água (m), evento de maio/2011. ....	93
Figura 41 – Velocidade máxima da água (m/s), evento de maio/2011. ....	94
Figura 42 – Distribuição de frequência da profundidade da água (m). ....	95
Figura 43 – Mapa indicador perigo – Profundidade da água máxima (m). ....	95
Figura 44 – Distribuição de frequência da velocidade de escoamento (m/s). ....	97
Figura 45 – Mapa indicador de perigo – Velocidade de escoamento máxima (m/s). ..	98
Figura 46 – Distribuição de frequência da força do escoamento ( $m^3/s^2$ ). ....	99
Figura 47 – Mapa indicador de perigo – Força do escoamento máxima ( $m^3/s^2$ ). ....	100
Figura 48 – Distribuição de frequência da energia específica da água (m). ....	101
Figura 49 – Mapa indicador de perigo – Energia Específica máxima (m). ....	102
Figura 50 – Distribuição de frequência da intensidade ( $m^2/s$ ). ....	103
Figura 51 – Mapa indicador de perigo – Intensidade máxima ( $m^2/s$ ). ....	104
Figura 52 – Mapa indicador de perigo – Combinação profundidade/velocidade. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipologias de danos decorrentes de inundações em áreas urbanas. ....	18
Tabela 2 – Localização dos pontos de inundação em Vitória de Santo Antão.....	25
Tabela 3 – Valores médios do parâmetro CN para diferentes tipos de uso do solo. .	29
Tabela 4 – Fórmulas do tempo de concentração recomendadas.....	32
Tabela 5 – Classificação de desempenho de modelos por dados estatísticos. ....	36
Tabela 6 – Descrição dos elementos hidrológicos do HEC-HMS.....	38
Tabela 7 – Modelos disponíveis para os elementos <i>subbasin</i> e <i>reach</i> . ....	39
Tabela 8 – Informações técnicas dos produtos do PE3D.....	52
Tabela 9 – Influência dos indicadores de perigo aos danos da inundação. ....	55
Tabela 10 – Faixas dos indicadores de perigo de inundação. ....	56
Tabela 11 – Dados dos postos pluviométricos selecionados. ....	68
Tabela 12 – Posto fluviométrico utilizado na modelagem hidrológica. ....	69
Tabela 13 – Eventos simulados na modelagem hidrológica. ....	76
Tabela 14 – Combinação da profundidade da água e velocidade de escoamento. ..	77
Tabela 15 – Características fisiográficas das sub-bacias da área de estudo.....	79
Tabela 16 – Valores de CN estimados para as sub-bacias da área de estudo.....	80
Tabela 17 – Parâmetros das sub-bacias após a calibração e validação.....	81
Tabela 18 – Coeficientes de desempenho para cada evento simulado. ....	81
Tabela 19 – Volume precipitado, de perdas e escoado em cada sub-bacia. ....	87
Tabela 20 – Hidrogramas simulados da sub-bacia Vitória Centro, evento maio/2011. .....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas Dimensões
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAWM	Campus Agreste Watershed Model
CN	Curve Number
EM-DAT	Emergency Events Database
GR4J	<i>Génie Rural à 4 Parâmetres Journalier</i>
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weight
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MDT	Modelo Digital do Terreno
NRCS	National Resources Conservation Service
NSE	Coefficiente de Desempenho de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Percent Bias
PE3D	Pernambuco Tridimensional
QGIS	Quantum Geographic Information System
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSR	Root Mean Standard Deviation Ratio
SCS	Soil Conservation Service
SI	Sistema Internacional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Rede Irregular Triangular

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1	INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS .....	16
3.2	INUNDAÇÕES EM VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PERNAMBUCO .....	20
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA .....	25
<b>3.3.1</b>	<b>Modelos hidrológicos</b> .....	<b>26</b>
3.3.1.1	Precipitação .....	26
3.3.1.2	Perdas .....	28
3.3.1.3	Transformação chuva-vazão .....	31
3.3.1.4	Propagação de vazão em rios .....	33
3.3.1.5	Calibração e validação de modelos .....	34
3.3.1.6	HEC-HMS .....	36
<b>3.3.2</b>	<b>Modelos hidrodinâmicos</b> .....	<b>43</b>
3.3.2.1	Classificação de modelos hidráulicos .....	43
3.3.2.2	Equações de águas rasas .....	45
3.3.2.3	HEC-RAS .....	47
3.4	DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO .....	50
3.5	MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO .....	54
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>58</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	58
<b>4.1.1</b>	<b>Localização e aspectos fisiográficos</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Área urbana de Vitória de Santo Antão</b> .....	<b>61</b>
4.2	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES .....	63
4.3	AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	64
<b>4.3.1</b>	<b>Dados geográficos e topográficos</b> .....	<b>65</b>
4.3.1.1	Fonte de dados vetoriais .....	65
4.3.1.2	Modelo Digital do Terreno (MDT) .....	65
<b>4.3.2</b>	<b>Dados hidrológicos</b> .....	<b>66</b>
4.3.2.1	Dados pluviométricos .....	66

4.3.2.2	Cálculo da precipitação média .....	68
4.3.2.3	Dados fluviométricos .....	69
<b>4.3.3</b>	<b>Pré-processamento e definição da rede de drenagem .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Curve Number (CN) e capacidade de infiltração do solo (S) .....</b>	<b>72</b>
4.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	73
4.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	74
4.6	EVENTOS SIMULADOS .....	76
4.7	MAPAS DE PERIGO .....	76
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>78</b>
5.1	PRÉ-PROCESSAMENTO .....	78
<b>5.1.1</b>	<b>Discretização da área de estudo .....</b>	<b>78</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Parâmetro CN .....</b>	<b>79</b>
5.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	80
5.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	86
5.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	88
5.5	MAPAS DE PERIGO .....	94
<b>5.5.1</b>	<b>Profundidade da água.....</b>	<b>94</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Velocidade de escoamento .....</b>	<b>97</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Força máxima do escoamento .....</b>	<b>99</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Energia específica da água .....</b>	<b>101</b>
<b>5.5.5</b>	<b>Intensidade .....</b>	<b>103</b>
<b>5.5.6</b>	<b>Combinação profundidade/velocidade .....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os principais impactos da urbanização desordenada, frequentemente observada nos municípios brasileiros, é possível citar as alterações nas características fisiográficas das bacias hidrográficas, como por exemplo a impermeabilização do solo, desmatamento da vegetação nativa, ocupação das margens dos rios, assoreamento dos corpos d'água, acúmulo de resíduos sólidos e poluição. Somado as mudanças climáticas, a urbanização não planejada, o mal planejamento, manutenção e obsolescência das infraestruturas urbanas de drenagem são alguns dos principais fatores para o crescimento da vulnerabilidade a inundações urbanas e suas consequências (MILLER; HUTCHINS, 2017).

Inundações, enchentes e alagamentos podem ocasionar uma série de impactos negativos à população e ao meio ambiente. Danos à agricultura, infraestruturas de transporte, residenciais, comerciais, danos à fauna e flora de um ambiente são comuns em desastres desse tipo (SAVAGE *et al.*, 2016; AFZAL *et al.*, 2022).

Os prejuízos causados podem ser classificados como tangíveis e intangíveis, sendo o primeiro deles relacionado aos custos monetários e, o segundo deles, é associado a custos que não podem ser mensurados por dinheiro, como vidas e patrimônio cultural (DUTTA *et al.*, 2003; ECKHARDT *et al.*, 2019). Países em desenvolvimento tem sofrido mais prejuízos tangíveis e intangíveis se comparados a países desenvolvidos, devido as frequentes e intensas inundações que ocorrem decorrentes das mudanças climáticas, visto que esses possuem menos recursos para mitigarem os impactos (RAZAVI *et al.*, 2020).

Os danos também podem ser categorizados como diretos ou indiretos. Danos diretos são associados ao contato físico entre a água de inundação e o objeto associado, enquanto o dano indireto existe quando não há contato com a água, como interrupções no comércio, indústria e/ou tráfego de uma região, por exemplo (BATISTA *et al.*, 2020).

Para prevenir os danos causados por enchentes e inundações (ou ao menos mitigar os seus impactos) é de fundamental importância compreender a resposta de ambientes urbanos a eventos hidrológicos extremos. Nesse foco, experimentos de campo, com coleta de dados históricos de eventos passados, podem se provar uma tarefa difícil devido à escassez ou a imprecisão de informações, por vezes sendo impossível de se realizar. Desse modo, se faz necessário a utilização de técnicas

facilitadoras para o entendimento da dinâmica das inundações em ambientes urbanos que, por sua vez, forneçam um embasamento técnico para a tomada de decisões na mitigação dos danos causados.

Nesse contexto, a utilização do Sensoriamento Remoto utilizado na modelagem hidrológica e hidrodinâmica vêm se mostrando uma ferramenta valiosa no entendimento desses processos. Esses modelos têm sido aplicados em diversas áreas da Hidrologia, como o mapeamento de risco de inundação (GOMES *et al.*, 2020; AL-HUSSEI *et al.*, 2022; SHAH *et al.*, 2022), avaliação de danos causados por inundações (BHUYIAN *et al.*, 2011; BATISTA *et al.*, 2020) e, geração de mapas de perigo de inundação (RIBEIRO NETO *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2016; ONGDAS *et al.*, 2020).

Para a criação de um sistema de medidas de mitigação contra inundações, o mapeamento do perigo de inundação é um passo fundamental (NAMARA *et al.*, 2022). Segundo o Atlas Digital de Desastres no Brasil (MDR, 2022), o município de Vitória de Santo Antão, em Pernambuco, é o quinto município do estado em número de desabrigados e desalojados devido a eventos hidrológicos extremos. Desse modo, o presente trabalho visa, através da utilização de modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional, desenvolver um método para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação e apresentar mapas com índices de perigo para o município de Vitória de Santo Antão, no estado de Pernambuco, no Nordeste brasileiro.

## 2 OBJETIVOS

Neste item serão apresentados os objetivos do presente trabalho.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar modelagem hidrológica e hidrodinâmica na elaboração de mapas de perigo de inundação no entorno do rio Tapacurá na região urbana do município de Vitória de Santo Antão – Pernambuco.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver, calibrar e validar modelo hidrológico no HEC-HMS para transformação chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Tapacurá;
- Desenvolver modelo hidrodinâmico em 2D no HEC-RAS integrando o modelo hidrológico;
- Gerar mapas com indicadores e índices de perigo à inundação e analisar a distribuição espacial das classes de perigo propostas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos pertinentes e trabalhos relevantes acerca dos seguintes tópicos: inundações em bacias urbanas, modelagem hidrológica e hidrodinâmica, dados espaciais de alta resolução e mapas de perigo de inundação.

#### 3.1 INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS

Tominaga *et al.* (2009) afirmaram que o fenômeno da inundação é o transbordamento das águas de um curso d'água atingindo a planície de inundação ou área de várzea. De modo semelhante, Singh *et al.* (2021) ressaltaram que inundações são causadas por precipitação intensa que acabam por produzir uma vazão maior que o leito do rio pode suportar, causando um extravasamento de água acima das margens do rio, invadindo assim, as regiões vizinhas.

As inundações podem ocorrer devido as chuvas intensas ou falha de uma barragem, por exemplo. Elas podem causar danos significativos à infraestrutura, como pontes, estradas, edifícios e culturas agrícolas, representando também um risco à vida humana, além da fauna e da flora de um determinado local. As condições pré-existentes na bacia de drenagem têm grande influência na ocorrência desse tipo de desastre, tais quais: o nível de água do rio, características do solo, como capacidade de infiltração e umidade, taxa de urbanização, presença de estruturas de contenção de água, proximidade com o nível do mar, entre outras (BRAKENRIDGE *et al.*, 2013).

Outra causa de inundações catastróficas é o rompimento de barragens, podendo essas serem para diversos fins, dentre eles, abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação, controle de cheias, depósito de rejeitos de mineração etc. A ocorrência de falhas na construção e na manutenção dessas estruturas pode acarretar o seu rompimento, trazendo consequências devastadoras para o meio ambiente e para a população que vive à jusante do barramento (FONSECA NETO *et al.*, 2017). Mais ainda como importante detalhe é que as causas dos desastres de inundações e enchentes são diversas, envolvendo o meio ambiente físico, a economia local e o desempenho das instituições e agentes públicos (JONOV *et al.*, 2013).

Observando a realidade dos municípios brasileiros, a exemplo de Vitória de Santo Antão, os centros urbanos crescem no entorno dos corpos d'água,

frequentemente de forma desordenada, ocupando locais indevidos como as planícies que formam o leito maior dos cursos d'água. O aumento da impermeabilização do solo, a canalização dos cursos d'água e a redução da seção de escoamento provocam o aumento da magnitude e frequência da vazão de pico, potencializando os transtornos causados por inundações (VERÇOSA, 2019).

Apesar de a maioria das inundações terem seu risco conhecido, visto que as inundações ribeirinhas são restritas às planícies de inundação, elas ainda apresentam perigo devido à natureza repentina desses eventos (WISNER *et al.*, 2014). Em pesquisa mais detalhada, Jonov *et al.* (2013) explicaram que os danos causados pelas inundações podem ser classificados em tangíveis e intangíveis e, em um segundo nível, em diretos e indiretos. Danos tangíveis são aqueles em que se pode quantificar o prejuízo de forma monetária, como os danos a infraestrutura e edificações, por exemplo, já os danos intangíveis são aqueles que não se pode mensurar de forma monetária, a exemplo das perdas de vida humana.

Já os danos diretos são aqueles que acontecem como consequência direta do contato da água de inundação com bens móveis, imóveis e pessoas, enquanto os danos indiretos são aqueles decorrentes de interrupções e perturbações das atividades socioeconômicas durante e após o processo de enchente (BATISTA *et al.*, 2020). Adicionalmente, Kundzewicz *et al.* (2019) evidenciaram que o dano associado as inundações é função não apenas da profundidade, velocidade e persistência da água, mas também do material dissolvido e suspenso que ela carrega. Sedimentos sólidos e materiais líquidos, incluindo uma ampla série de poluentes, podem afetar a área inundada, frequentemente apresentando um sério risco à saúde

Em estudo referente às águas de inundação, Wisner *et al.* (2014) argumentaram que elas aumentam o risco de doenças como a cólera e a diarreia provenientes da contaminação da água potável pelo esgoto. Também existe a possibilidade de um rápido crescimento na incidência de doenças como a malária e febre amarela, devido a multiplicação dos vetores de insetos na água estagnada após a enchente.

Jonov *et al.* (2013) pesquisaram as tipologias de danos decorrentes de inundações em áreas urbanas, conforme resumo apresentado no Tabela 1.

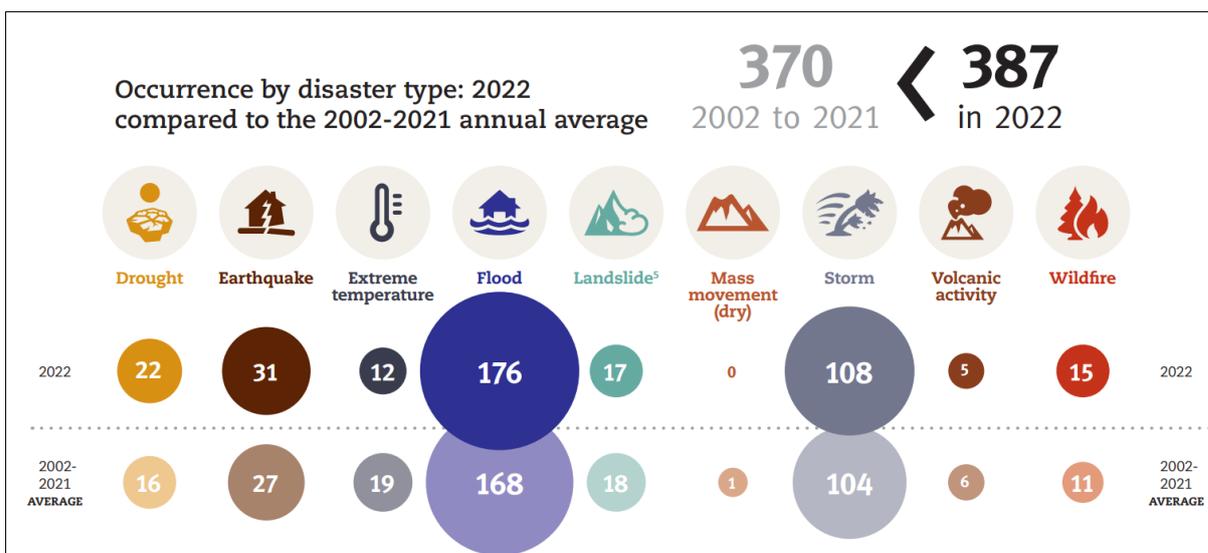
Tabela 1 – Tipologias de danos decorrentes de inundações em áreas urbanas.

<b>Danos tangíveis</b>	
<b>Danos diretos</b>	<b>Danos indiretos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Danos físicos aos domicílios.</li> <li>- Danos físicos ao comércio e serviços: construção e conteúdo (mobiliário, estoques, mercadorias em exposição etc.)</li> <li>- Danos físicos aos equipamentos e plantas industriais.</li> <li>- Danos físicos à infraestrutura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custos de limpeza, alojamento e medicamentos.</li> <li>- Realocação do tempo e dos gastos na reconstrução.</li> <li>- Perda de renda.</li> <li>- Lucros cessantes, perda de informações e bases de dados.</li> <li>- Interrupção da produção, perda de produção e de receita. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados.</li> <li>- Perturbação, paralisações e congestionamento nos serviços, custos adicionais de transporte, efeitos multiplicadores dos danos sobre outras áreas.</li> </ul>
<b>Danos intangíveis</b>	
<b>Danos diretos</b>	<b>Danos indiretos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ferimentos e perda de vida humana.</li> <li>- Doenças pelo contato com a água, como resfriados e infecções.</li> <li>- Perda de objetos de valor sentimental.</li> <li>- Perda de patrimônio histórico e cultural.</li> <li>- Perda de animais de estimação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estados psicológicos de estresse e ansiedade.</li> <li>- Danos de longo prazo à saúde.</li> <li>- Falta de motivação para o trabalho.</li> <li>- Inconvenientes de interrupção e perturbações nas atividades econômicas, meios de transporte e comunicação.</li> <li>- Perturbação no cotidiano dos moradores.</li> </ul>

Fonte: Jonov *et al.* (2013).

Conforme o último relatório EM-DAT houve 176 ocorrências de inundações ao redor do mundo no ano de 2022 (acima da média de 168, registrada de 2002 a 2021), sendo assim o tipo de desastre mais comum, correspondendo a aproximadamente 45,6% dos desastres registrados no ano de 2022 em escala global (EM-DAT, 2023), conforme mostra a Figura 1.

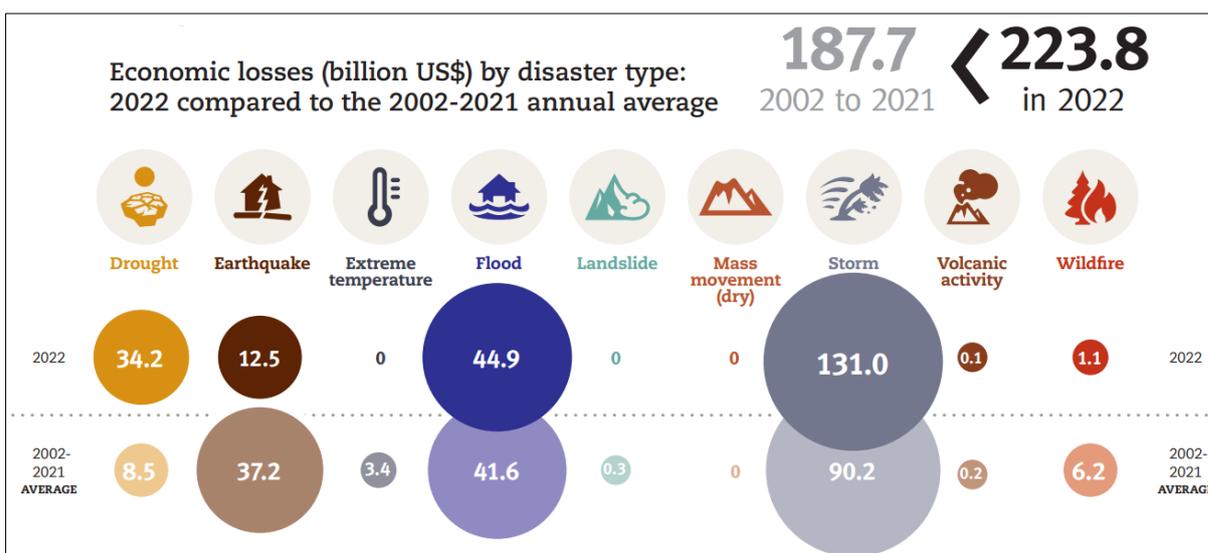
Figura 1 – Ocorrências de desastres no mundo classificados por tipo.



Fonte: EM-DAT (2023).

Ainda segundo o relatório do EM-DAT (2023), essas ocorrências afetaram de alguma maneira a vida de 57,1 milhões de pessoas, levando a 7954 mortes, sendo 272 delas no Brasil. Em relação aos danos tangíveis, as enchentes geraram um prejuízo de 44,9 bilhões de dólares apenas no ano de 2022 (Figura 2).

Figura 2 – Perdas econômicas (em bilhões de dólares) por tipo de desastre.



Fonte: EM-DAT (2023).

Estudos sugerem que haverá um aumento no número de pessoas afetadas por enchentes e inundações nas décadas por vir devido ao crescimento da densidade

populacional em áreas urbanas e a expansão dos perímetros urbanos em regiões vulneráveis a inundações (GÜNERALP *et al.*, 2015).

Para o período de 1980 a 2011, as perdas monetárias estimadas devido a inundações (ajustadas pela inflação) saíram de, em média, U\$ 7 bilhões por ano na década de 80 para U\$ 24 bilhões por ano na década de 2001 até 2011 (KUNDZEWICZ *et al.*, 2014). Entretanto, parte desse acréscimo nos custos estimados podem ser atribuídos aos avanços nos registros de eventos extremos, ao aumento da população e urbanização de áreas suscetíveis, aumento no valor das propriedades imóveis, conforme argumentaram Peduzzi *et al.* (2012).

### 3.2 INUNDAÇÕES EM VITÓRIA DE SANTO ANTÃO - PERNAMBUCO

O município de Vitória de Santo Antão, localizado na Zona da Mata pernambucana, é frequentemente acometido por eventos hidrológicos extremos, causando, alagamentos, enchentes e por vezes inundações que causam uma série extensiva de danos tangíveis e intangíveis.

No estado de Pernambuco, segundo o Atlas Digital de Desastres no Brasil (MDR, 2022), houve 622 ocorrências no período de 1991 a 2021, afetando um total de 3,26 milhões de pessoas, resultando em 371.852 desabrigados e desalojados, desse total e 162 óbitos. No município de Vitória de Santo Antão, estima-se que 33 mil pessoas foram afetadas por desastres hidrológicos, com 14 mil desabrigados, fazendo dele o quinto lugar em números de desalojados e desabrigados devido a inundações no estado. Causando um custo da ordem de R\$ 13,52 milhões em danos materiais e prejuízos (em dados a partir de 1995 e com valores corrigidos).

Em junho de 2005, o município de Vitória de Santo Antão o posto pluviométrico Nº 26 do IPA, operado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, registrou um total de 621,7 mm de chuva, sendo 253,4 mm apenas nos dias 2 e 3 desse mês (APAC, 2023). De modo geral todos os bairros sofreram com os efeitos desse evento extremo, porém os bairros localizados às margens do rio suportaram os maiores prejuízos, a exemplo dos bairros da Matriz, Centro, Amparo e Universitário.

As pontes do Galucho, do Amparo e do Dique sofreram danos em suas estruturas que levaram dias para serem consertados. A Figura 3A mostra a ponte do Galucho, principal acesso a sede urbana do município, completamente encoberta por

água, enquanto a Figura 3B mostra como ficou a ponte do Dique após a inundação, sustentando danos que não permitiram a sua utilização por um longo período.

A cabeceira da ponte do Amparo, próximo ao Campo do Treze, foi totalmente tomada pela água, como mostra a Figura 3C, sendo essa uma área claramente pertencente ao primeiro terraço do rio, só que a época já havia sido tomada por residências e comércio. Além disso, ruas e avenidas importantes do centro urbano de Vitória também foram severamente atingidas, a Avenida Mariana Amália, no Centro, e a Avenida Henrique de Holanda foram tomadas pela água, danificando diversas residências e comércios. A Figura 3D mostra como ficou o pátio onde é realizado a feira no centro da cidade, próximo ao Pátio de Eventos Otóni Rodrigues.

Figura 3 – Inundação de 2005 em Vitória de Santo Antão.



Fonte: Jornal A Verdade (2005).

No ano de 2010, entre os dias 16 e 19 de junho choveu um acumulado de 228,3 mm, sendo 155 mm apenas no dia 18/06/2010 (APAC, 2023), o suficiente para causar inundações que culminaram na declaração de estado de calamidade pública, a partir do Decreto Municipal n 100/2010. De modo semelhante ao evento de 2005, as chuvas intensas causaram a inundação do rio Tapacurá, trazendo uma série de transtornos e prejuízos ao município. Na Figura 4A é possível observar a ponte do

Galucho, diferente de 2005 ela não foi totalmente inundada, mas ainda assim foi necessário a interdição do acesso à ponte como medida de segurança.

Como Vitória de Santo Antão é uma cidade que cresceu ocupando a planície de inundação, é notável como os transtornos se alastram ao longo de todo o eixo do rio, passando pelo bairro da Mangueira, ao sul da sede urbana, como evidenciado pela inundação nas imediações da ponte do Jardim Ipiranga Figura 4B, seguindo pelo Centro, a exemplo do Pátio de Eventos Otóni Rodrigues completamente submerso na Figura 4C, e se estendendo até o bairro do Cajá, já depois da entrada pela BR-232, na porção mais ao norte da cidade (Figura 4D).

Figura 4 – Inundação de 2010 em Vitória de Santo Antão.



Fonte: Nascimento (2010).

Em 2011, enquanto o município nem havia terminado de executar as obras para recuperar os danos causados pelas chuvas extremas do ano anterior, um novo evento climático provocou uma grande inundação na sede urbana de Vitória de Santo Antão. No dia 05/05/2011 choveu um volume de 108,5 mm, que somado aos quatro dias

anteriores que também foram de chuvas fortes, resultou em 207,3 mm nos cinco primeiros dias desse mês (APAC, 2023).

A ponte do Amparo, que havia sofrido danos severos no evento de 2010, ainda não havia sido recuperada e a sua estrutura em reconstrução foi completamente levada pela enxurrada (Figura 5A). A ponte férrea (Figura 5B), que era a única passagem por cima do rio no bairro do Amparo e que é a ponte mais alta da cidade quase teve sua estrutura atingida. Novamente, ruas importantes do Centro sofreram com a inundação e com alagamentos, a Av. Mariana Amália ficou debaixo d'água, como mostram as fotos na Figura 5 C e D.

Figura 5 – Inundação de 2011 em Vitória de Santo Antão.

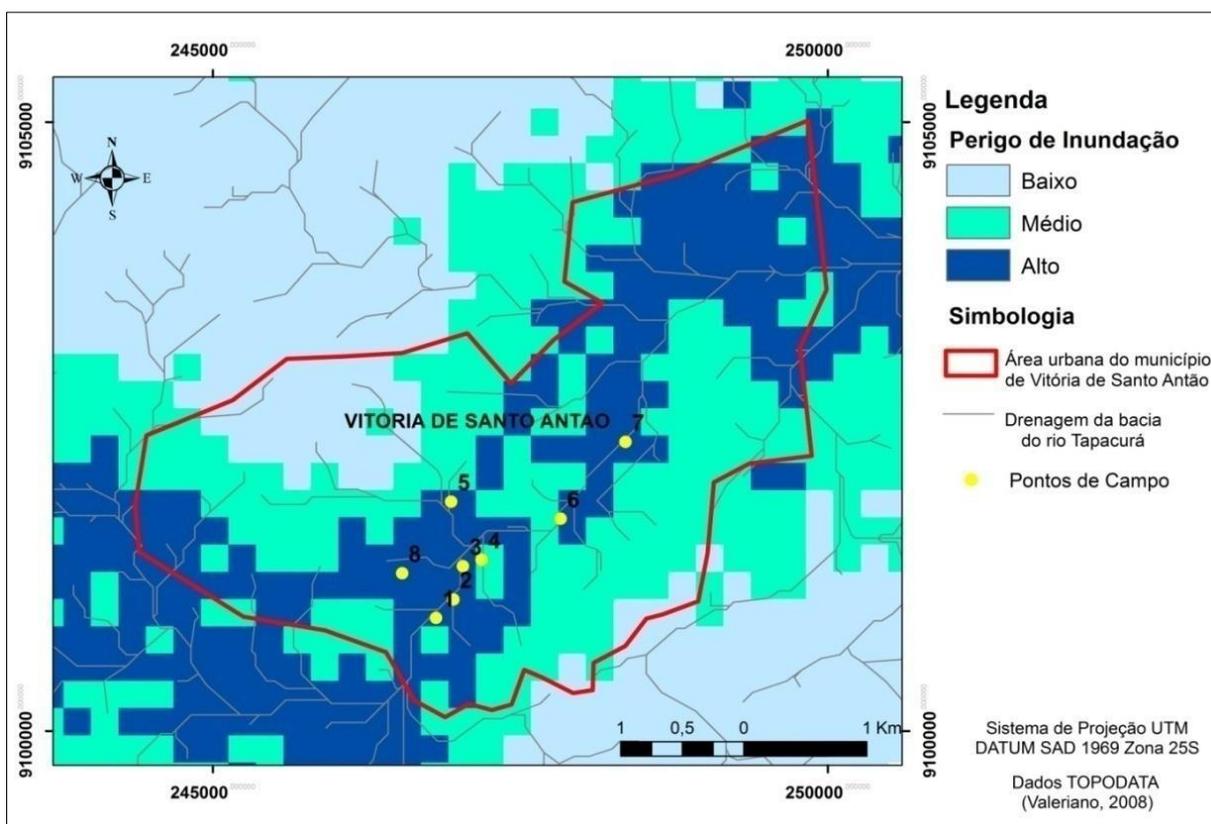


Fonte: Nascimento (2011).

Miranda *et al.* (2017) analisaram o perigo de inundação na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, dando ênfase a zona urbana do município de Vitória de Santo Antão. A partir de uma metodologia que associa alguns aspectos morfométricos da bacia hidrográfica, como declividade do terreno e a densidade da rede de drenagem, foi

obtido o mapa de perigo de inundação para a região (Figura 6). Os autores concluíram que o local com maior incidência de inundações é o médio curso da bacia, exatamente no local onde se encontra o distrito sede do município de Vitória de Santo Antão. Os autores também mapearam os pontos mais críticos observados em campo, frequentemente afetados por eventos extremos desse tipo, a Tabela 2 apresenta os pontos que foram mapeados (destacados em amarelo na Figura 6).

Figura 6 – Mapa de perigo de inundação em Vitória de Santo Antão.



Fonte: Miranda *et al.* (2017).

Analisando os pontos mais críticos levantados pelos autores, é possível concluir que as regiões mais próximas a calha do rio, como nas pontes do Jardim Ipiranga, ponte do Dique e ponte do Galucho são os que apresentam o maior perigo quanto a inundação. Além dos citados, endereços importantes para o comércio da cidade, como o pátio de eventos e a avenida Mariana Amália, no Centro, também apresentam elevado perigo.

Tabela 2 – Localização dos pontos de inundação em Vitória de Santo Antão.

<b>Localização dos Pontos em UTM</b>			
Ponto	Identificação	E (m)	N (m)
1	Primeiro contato do rio com a zona urbana	246.815	9.100.930
2	Ponte de Jardim Ipiranga	246.956	9.101.081
3	Pátio de eventos no centro da cidade	247.034	9.101.355
4	Ponte Ns. Sra. do Amparo no Centro	247.186	9.101.407
5	Av. Mariana Amália, próximo ao BB	246.937	9.101.883
6	Ponte do Dique em Lídia Queiroz	247.828	9.101.744
7	Ponte do Galucho nos Ferreiros	248.355	9.102.374
8	Est. Meteorológica R. Demócrito Cavalcanti	246.539	9.101.297

Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* (2017).

### 3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

Modelos são representações simplificadas de um fenômeno real, que tem por objetivo facilitar a compreensão das variáveis e componentes que atuam nesse determinado fenômeno (TUCCI, 2005).

Nesse contexto, os modelos hidrológicos permitem avaliar os diferentes processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, a exemplo da precipitação, das perdas (interceptação, armazenamento superficial e infiltração), o escoamento superficial e a propagação da vazão em rios. Já os modelos hidrodinâmicos procuram descrever o comportamento e o movimento da água na rede de drenagem, ou seja, levam em consideração as características hidráulicas do escoamento. Desse modo, os modelos hidrodinâmicos possibilitam, por exemplo, a simulação da velocidade de escoamento, altura da lâmina de água em pontos determinados, cotas e extensão da planície de inundação.

Os itens 3.3.1 e 3.3.2 explicam em detalhes as componentes e os processos utilizados para a modelagem hidrológica e hidrodinâmica, respectivamente, no presente trabalho.

### 3.3.1 Modelos hidrológicos

Segundo Kaiser (2006), os modelos hidrológicos podem ser utilizados para uma variedade de finalidades, dentre as quais: estender séries de dados fluviométricos na elaboração de projetos de engenharia, simular vazões em cursos d'água de bacias submetidas a intervenções, gerenciar barragens e sistemas de alerta de cheias, analisar o impacto de obras hidráulicas e ações antrópicas numa bacia hidrográfica, entre outras possibilidades.

Gomes *et al.* (2021) utilizaram os modelos hidrológicos HEC-HMS (*Hydrological Modeling System*) e CAWM IV (*Campus Agreste Watershed Model IV*) e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS (*River Analysis System*) para simular os eventos de inundação de 1975 e 2011 em Recife, a fim de se avaliar o desempenho do sistema de proteção contra enchentes instalado na bacia do Capibaribe.

Batista *et al.* (2020) utilizaram o modelo hidrológico HEC-HMS para simular o processo de transformação chuva-vazão ao longo da bacia hidrográfica do rio Pirapama para, associado a modelagem hidrodinâmica com o HEC-RAS, avaliar os danos associados a inundações na área urbana do município de Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco.

De maneira geral, os modelos hidrológicos possuem quatro componentes fundamentais, a precipitação, as perdas, a transformação e a propagação da vazão. Os itens a seguir apresentam as componentes do modelo hidrológico com enfoque no programa de livre acesso HEC-HMS (USACE, 2022a).

#### 3.3.1.1 Precipitação

A precipitação é a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica. Para simulação de eventos extremos em modelos hidrológicos, geralmente utilizam-se dados de estações pluviométricas como informação de entrada. Entretanto, as informações pluviométricas são pontuais, desta forma, para a criação de uma superfície contínua de precipitação e o consequente cálculo da mesma em uma área, é necessário a utilização de interpoladores.

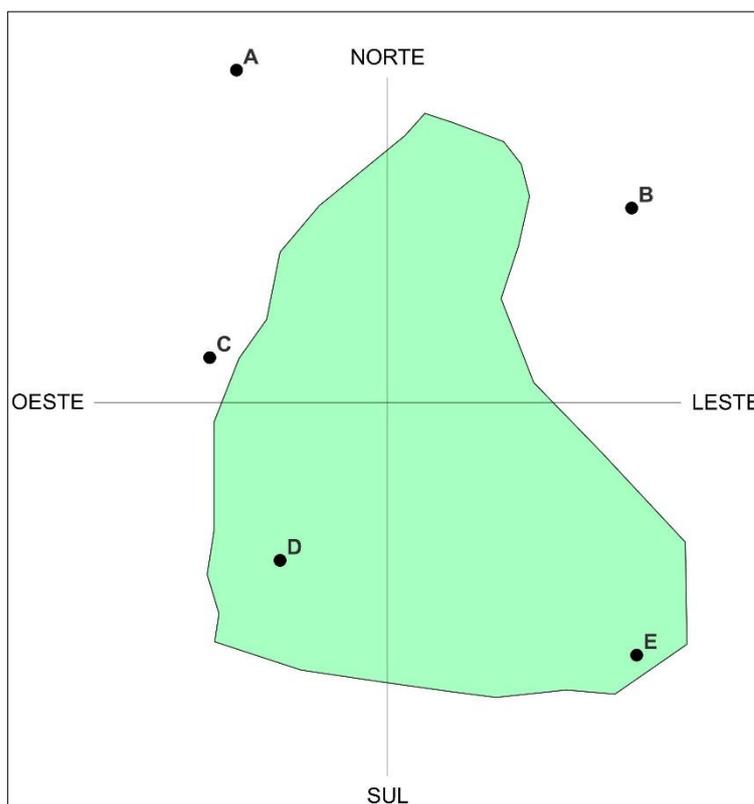
Entre os modelos de interpolação existentes, um frequentemente utilizado é o do Inverso da Distância ao Quadrado (IDW). Segundo Silva *et al.* (2013), o IDW realiza a estimativa da precipitação ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos

valores mais próximos ao ponto para onde a precipitação média está sendo calculada. Para ilustrar como o interpolador é aplicado, tem-se a Figura 7 representando a delimitação de uma bacia hidrográfica e cinco postos pluviométricos (A, B, C, D e E).

Primeiramente, deve-se escolher o ponto ao qual deseja-se calcular a precipitação média, em seguida, utilizando o ponto escolhido como é definido como a origem de dois eixos hipotéticos NORTE-SUL, LESTE-OESTE de modo a produzir quatro quadrantes. Para cada quadrante é selecionada a estação mais próxima da origem (SILVA *et al.*, 2013).

A próxima etapa é o cálculo do peso de cada estação como uma função inversamente proporcional ao quadrado da distância entre ela e o ponto escolhido. A Equação (1) exemplifica o cálculo do coeficiente de ponderação para a estação C.

Figura 7 – Exemplo de bacia hidrográfica com cinco estações.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2013).

$$w_C = \frac{\frac{1}{d_C^2}}{\frac{1}{d_C^2} + \frac{1}{d_D^2} + \frac{1}{d_E^2} + \frac{1}{d_B^2}} \quad (1)$$

Onde  $w_C$  é o peso atribuído à estação C;  $d_C$  é a distância do ponto de análise até a estação C;  $d_D$  é a distância do ponto de análise até a estação D;  $d_E$  é a distância do ponto de análise até a estação E; e  $d_B$  é a distância do ponto de análise até a estação B.

As ordenadas do hietograma do ponto de análise no momento  $t$ , é calculado através da Equação (2):

$$p_{\text{ponto}}(t) = w_B p_B(t) + w_C p_C(t) + w_D p_D(t) + w_E p_E(t) \quad (2)$$

Onde  $p_{\text{ponto}}(t)$  é a precipitação no ponto de análise no momento  $t$ ;  $p_B(t)$ ,  $p_C(t)$ ,  $p_D(t)$  e  $p_E(t)$  é a precipitação nas estações B, C, D e E, respectivamente, no momento  $t$ ; e  $w_B$ ,  $w_C$ ,  $w_D$  e  $w_E$  são os pesos atribuídos as estações B, C, D e E.

Importante observar que o posto A não foi utilizado no interpolador pois não é o posto mais próximo do ponto de análise no quadrante em que está presente (quadrante Noroeste). Caso haja uma falha na ordenada da precipitação do posto C do exemplo os dados da estação A serão utilizados (mesmo que esse valor seja zero).

### 3.3.1.2 Perdas

As perdas representam a parcela da precipitação que não contribui para a geração do escoamento superficial. Diversos são os motivos para o acontecimento desse fenômeno, por exemplo, interceptação da água pela vegetação, depressões impermeáveis, rachaduras ou cobertas, bem como o armazenamento superficial ou ainda a infiltração de água no solo. Dentre os métodos para o cálculo das perdas, um que recebe destaque é o modelo SCS – CN, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* – SCS (atual *National Resources Conservation Service* – NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture* – USDA).

Shi e Wang (2020) argumentaram que a popularidade desse método se deve a sua simplicidade, conveniência, comum aceitação, aplicabilidade a bacias não monitoradas e ao fato de requerer apenas um parâmetro, o *Curve Number* (CN), que é relacionado as características do solo e da ocupação da bacia.

O parâmetro CN retrata as condições de cobertura e uso do solo, variando desde uma cobertura muito permeável até uma cobertura completamente impermeável e de um solo com grande capacidade de infiltração para um de baixa infiltração (TUCCI, 2005). A Tabela 3 apresenta o valor médio do CN para diversas categorias de uso do solo encontrados em ocupações urbanas relacionados a quatro tipos de solo.

Tabela 3 – Valores médios do parâmetro CN para diferentes tipos de uso do solo.

Descrição do uso do solo	Tipo de solo				
	A	B	C	D	
Espaços abertos:					
Matos/gramas cobrem 75% ou mais da área	39	61	74	80	
Matos cobrem 50 a 75% da área	49	69	79	77	
Áreas comerciais (85% impermeáveis)	89	92	94	95	
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93	
Áreas residenciais:					
tamanho do lote (m <sup>2</sup> )	área impermeável (%)				
< 500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques, estacionamentos, telhados e viadutos	98	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:					
Asfaltadas e com drenagem pluvial	98	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91	91
Terra	72	82	87	87	89

Fonte: Tucci (2005).

Segundo Tucci (2005), os tipos de solos identificados na tabela são:

- **Solo A:** solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos com pouco silte e argila;
- **Solo B:** solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que do tipo A e com permeabilidade superior à média;
- **Solo C:** solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo; e

- **Solo D:** solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Sabendo o CN médio para a bacia estudada, torna-se possível calcular o parâmetro S (capacidade máxima de armazenamento da água na camada superior do solo), determinado através do experimento em diversas bacias rurais nos Estados Unidos na década de 1950 (HAWKINS *et al.*, 2009) que resultou na Equação (3):

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN} \quad (3)$$

Conforme o *National Engineering Handbook* do SCS (1979), o modelo SCS – CN estima a precipitação efetiva (a parcela da precipitação que de fato contribui para o escoamento superficial) como função da precipitação acumulada e das condições de cobertura, uso, tipo e umidade antecedente do solo, inicialmente a precipitação efetiva é dada através da Equação (4):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

Onde:  $P_e$  – precipitação efetiva acumulada no tempo;  $P$  – precipitação acumulada no tempo;  $I_a$  – perdas iniciais (incluindo acúmulo de água na superfície, interceptação e infiltração no solo antes do início da geração de escoamento superficial; e  $S$  – máxima infiltração acumulada potencial (capacidade da bacia em reter a precipitação).

Analisando as médias dos dados experimentais de chuva e vazão para pequenas bacias, foi desenvolvida a relação para as variáveis  $I_a$  e  $S$ , apresentada na Equação (5):

$$I_a = 0,2 * S \quad (5)$$

Combinando as Equações (4) e (5), temos:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S} \quad (6)$$

Desse modo, a Equação (6) representa a relação chuva-vazão utilizada no método SCS para estimar a vazão a partir de uma determinada precipitação.

### 3.3.1.3 Transformação chuva-vazão

O método de transformação chuva-vazão (*Transform method*) avalia o excedente de precipitação que se tornará escoamento superficial (hidrograma de vazão). Um dos modelos mais comuns para realização da transformação chuva-vazão é o Hidrograma Unitário Sintético do SCS.

O passo inicial para a aplicação do modelo é a obtenção do tempo de concentração na bacia, que pode ser estimado através da equação empírica de Kirpich, que leva em consideração características fisiográficas da bacia, como comprimento do curso d'água principal e diferença de altitude ao longo do curso d'água principal, conforme a Equação (7):

$$t_c = 57 * \left( \frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (7)$$

Onde:  $t_c$  – tempo de concentração (minutos);  $L$  – comprimento do curso d'água principal (km);  $\Delta h$  – diferença de altitude ao longo do curso d'água principal (m).

O cálculo do tempo de concentração, como visto, é dependente de características físicas da bacia e, por ser de natureza empírica, é alvo de diversos estudos que procuram otimizar o seu cálculo para as diferentes características encontradas em bacias hidrográficas.

O estudo realizado por Silveira (2005) procurou comparar o desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais, o autor calculou o erro médio percentual (EM%) e o seu desvio-padrão, ou erro-padrão (EP%), de cada fórmula através da comparação entre os tempos de concentração calculados e observados. Com isso, foi feita a recomendação de qual fórmula usar para cada situação (bacia urbana ou rural e área de estudo. A Tabela 4 apresenta a ordem de

preferência (indicada pelo número e pelo sufixo R para rural e U para urbana) para as fórmulas do tempo de concentração:

Tabela 4 – Fórmulas do tempo de concentração recomendadas.

Fórmulas	Referência	Ordem	Bacias Rurais			Bacias Urbanas		
			Área (km <sup>2</sup> )	EM (%)	EP (%)	Área (km <sup>2</sup> )	EM (%)	EP (%)
Corps E.	MOPU (1987)	1R	<12000	9	21			
V. Chow	MOPU (1987)	2R	<12000	-7	19			
Onda Cin.	Porto (1995)	3R	<12000	2	20			
Kirpich	Porto (1995)	4R, 3U	<12000	-9	19	< 2700	1	39
Carter	McCues <i>et al.</i> (1984)	1U				< 1100	1	40
Schaake	Schaake <i>et al.</i> (1967)	2U				< 62	-9	30
Desbordes	Desbordes (1974)	4U				< 5100	11	49

Fonte: Silveira (2005).

O passo seguinte é a determinação do tempo de pico do hidrograma, que é estimado como 60% do tempo de concentração, conforme a Equação (8):

$$t_{lag} = 0,6 * t_c \quad (8)$$

Em seguida, é calculado o tempo de ascensão do hidrograma através da Equação (9):

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (9)$$

Onde  $\Delta t$  – duração da precipitação efetiva (minutos).

Finalmente, calcula-se a vazão de pico do hidrograma unitário através da Equação (10):

$$U_p = 2,08 * \left( \frac{A}{T_p} \right) \quad (10)$$

Onde  $U_p$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $A$  é a área da bacia hidrográfica ( $km^2$ ); e  $T_p$  é o tempo de ascensão (horas).

### 3.3.1.4 Propagação de vazão em rios

Os modelos de propagação de vazão em rios têm como objetivo determinar o hidrograma de vazões em uma determinada seção transversal do rio, baseando-se no hidrograma conhecido em uma ou mais seções transversais localizadas à montante (NEVES, 2019). Um dos modelos mais utilizados é o método Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969) que se baseia na combinação dos princípios da conservação de massa e conservação do momento (uma forma simplificada que se aproxima da onda de difusão). A equação utilizada no modelo pode ser vista na Equação (11):

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \quad (11)$$

Onde:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  – coeficientes;  $I_{t-1}$  e  $I_t$  ordenadas dos hidrogramas de entrada nos tempos  $t-1$  e  $t$ ;  $O_{t-1}$  – ordenadas do hidrograma de saída no tempo  $t-1$ ;  $q_L$  – contribuição lateral;  $\Delta x$  – extensão do trecho do canal (m).

Os coeficientes exibidos na Equação (11) são definidos pelas Equações (12), (13), (14) e (15):

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (13)$$

$$C_3 = \frac{2(X - 1) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (14)$$

$$C_4 = \frac{2 \left( \frac{\Delta t}{K} \right)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (15)$$

Onde  $K$  – tempo de deslocamento da onda de cheia no canal em segundos;  $X$  – fator de ponderação ( $0 \leq X \leq 0,5$ ); e  $\Delta t$  – passo de tempo.

Os parâmetros  $K$  e  $X$ , citados acima, são dados pelas Equações (16) e (17), respectivamente:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (16)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x} \right) \quad (17)$$

Onde:  $Q$  – vazão de referência no exutório ( $m^3/s$ );  $B$  – largura da superfície da água (m);  $S_o$  – declividade longitudinal do fundo do rio (m/m); e  $c$  – celeridade cinemática da onda de cheia (m/s).

### 3.3.1.5 Calibração e validação de modelos

A etapa de calibração e validação do modelo se refere ao ajuste da simulação com a realidade observada, no caso de modelos hidrológicos é comum comparar o hidrograma de vazão simulada em determinado ponto da bacia com o hidrograma de vazão observado (medido por uma estação fluviométrica, por exemplo) no mesmo ponto. Conforme argumentado por Brighenti *et al.* (2019), o critério estatístico mais utilizado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos é o Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Esse coeficiente é dado pela Equação (18) apresentada a seguir:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \right] \quad (18)$$

Onde:  $n$  – número de valores observados;  $O_m$  – média dos valores observados;  $O_i$  – valores observados;  $S_i$  – valores simulados;  $NSE$  – Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Os valores de  $NSE$  variam de  $-\infty$  a 1, onde 1 representa um ajuste perfeito, logo, o objetivo de todo modelo é se aproximar o máximo possível de  $NSE = 1$ , naturalmente é praticamente impossível se obter um ajuste perfeito na simulação de modo que diversos autores criaram metodologias para classificar o resultado.

Silva *et al.* (2008) concluíram que quando o valor do  $NSE$  for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de  $NSE$  entre 0,36 e 0,75, o desempenho do modelo é considerado aceitável e para valores de  $NSE$  inferiores a 0,36 o modelo é tido como inaceitável.

Além disso, outros índices estatísticos de desempenho também são comumente utilizados na avaliação da qualidade de modelos hidrológicos, a exemplo do *Percent Bias* ( $Pbias$ ) e o *Root Mean Standard Deviation Ratio* ( $RSR$ ), calculados a partir das Equações (19) e (20), respectivamente.

$$Pbias = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (19)$$

$$RSR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \quad (20)$$

O  $Pbias$  mede a tendência média dos dados simulados no modelo serem maiores ou menores que os dados observados, seus valores podem variar de  $-\infty$  até  $+\infty$ , sendo o valor ideal igual a zero. Já o  $RSR$  estima o erro médio quadrático normalizado pelo desvio padrão dos dados observados, seus valores vão de um ajuste perfeito em zero até o infinito. Moriase *et al.* (2007) também classificaram os valores dos índices de desempenho  $NSE$ ,  $Pbias$  e  $RSR$  como Muito Bom, Bom, Satisfatório e Insuficiente conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação de desempenho de modelos por dados estatísticos.

Classificação	NSE	Pbias	RSR
Muito Bom	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	0 a 0,5
Bom	0,65 a 0,75	$\pm 10$ a $\pm 15$	0,5 a 0,6
Satisfatório	0,5 a 0,65	$\pm 15$ a $\pm 25$	0,6 a 0,7
Insuficiente	$< 0,5$	$> \pm 25$	$> 0,7$

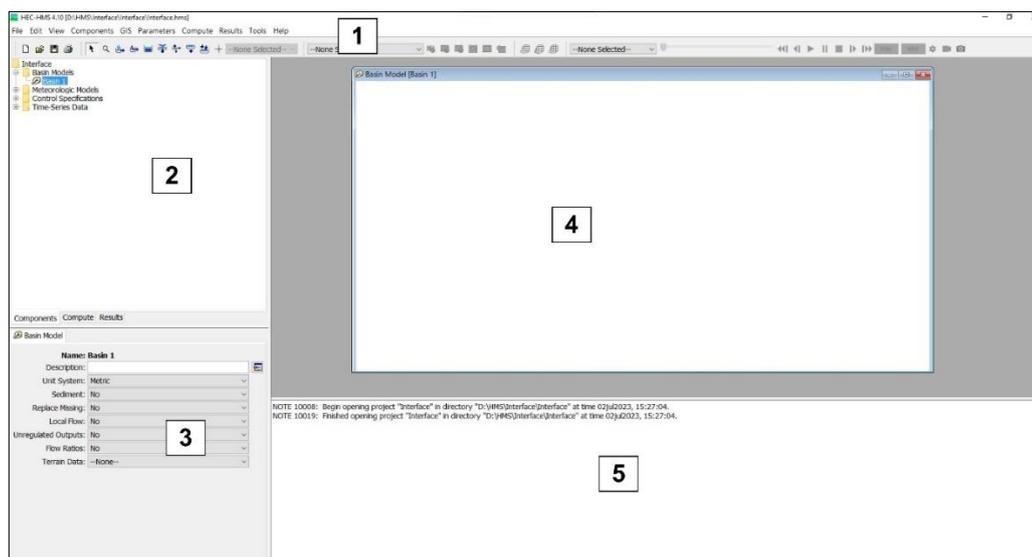
Fonte: Moriasi *et al.* (2007).

### 3.3.1.6 HEC-HMS

O HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) é um programa de livre acesso desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) que tem por objetivo representar processos hidrológicos em bacias hidrográficas, incluindo uma variedade de modelos para desempenhar tais processos, por exemplo, para transformar chuva total em chuva efetiva o HEC-HMS permite a utilização do modelo taxa inicial e constante (*Initial and Constant*) e o método SCS (*Soil Conservation Service*) (CAMPOS, 2009).

A interface da versão 4.10 do programa pode ser observada na Figura 8. A interface dispõe de barras de título, menu e ferramentas (1), além do painel Explorador de Bacia Hidrográfica (2), Editor de Componentes (3), Área de Trabalho (4) e Painel de Mensagens (5).

Figura 8 – Interface do HEC-HMS versão 4.10.



Fonte: Adaptado de USACE (2022a).

Segundo o Manual do Usuário do HEC-HMS 4.10 (USACE, 2022a), na Barra de Menu e Ferramentas é possível acessar as principais configurações gerais do programa (como salvar e abrir projetos, importar e exportar dados, definição de padrões etc.), bem como criar as componentes hidrológicas disponíveis no modelo (modelo de bacia, modelo meteorológico, especificações de controle, séries de dados, entre outros), sendo possível também o ajuste dos parâmetros dos modelos hidrológicos escolhidos, acesso ao menu de simulação e resultados.

No painel Explorador de Bacia Hidrográfica é possível acessar de maneira rápida todos os Componentes, Subcomponentes e Elementos Hidrológicos (e os processos associados a cada elemento), é subdividido em *Components*, *Compute* e *Results*.

No painel Editor de Componentes é possível inserir dados no Componente, Subcomponente ou Elemento Hidrológico selecionado no Explorador de Bacia Hidrográfica.

A Área de Trabalho exibe os Elementos Hidrológicos e suas conexões adicionados ao modelo que tem por fim representar a bacia hidrográfica. Nesse painel é possível acrescentar arquivos que auxiliem na simulação, seja elementos obrigatórios como o MDT (Modelo Digital de Terreno) ou arquivos *shapefile* contendo a rede de rios já discretizada, mas também pode ser adicionado a Área de Trabalho mapas de fundo para melhorar a visualização da região de estudo.

O Painel de Mensagens exibe alertas, avisos e mensagens de erro, sendo a principal forma de comunicação do programa com o usuário.

Dentro do componente do Modelo de Bacia (*Basin Model*), existe uma série de Elementos Hidrológicos que podem ser utilizados para representar a Bacia Hidrográfica a ser estudada, são eles: *Subbasin*, *Reach*, *Junction*, *Source*, *Sink*, *Reservoir* e *Diversion*, apresentados em detalhes na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição dos elementos hidrológicos do HEC-HMS.

Elemento Hidrológico	Descrição
Sub-bacia – <i>Subbasin</i> 	A Sub-bacia é utilizada para representar a bacia hidrográfica. Dada a precipitação, a vazão no exutório é calculada subtraindo as perdas, calculando o escoamento superficial e adicionando o escoamento de base.
Trecho – <i>Reach</i> 	O Trecho é utilizado para conduzir as vazões do modelo da bacia. A vazão de entrada no trecho pode vir de um ou mais elementos a montante. A saída do trecho é calculada pela translação e atenuação. Perdas no canal podem ser incluídas.
Junção – <i>Junction</i> 	A Junção é utilizada para combinar a vazão dos elementos localizados a montante da junção. A entrada na junção pode se originar de um ou mais elementos à montante. A vazão de saída é calculada pela soma das entradas.
Fonte – <i>Source</i> 	A Fonte é o elemento utilizado para introduzir vazão no modelo. O elemento "Fonte" não possui entrada de vazão. A saída é definida pelo usuário.
Sumidouro – <i>Sink</i> 	O Sumidouro é utilizado para representar o exutório do modelo. A entrada de vazão pode se originar de um ou mais elementos a montante. Não há saída do sumidouro.
Reservatório – <i>Reservoir</i> 	O Reservatório é utilizado para modelar o armazenamento de água ou atenuação de cheias. O fluxo de entrada para o reservatório pode vir de um ou mais elementos a montante. A saída pode ser calculada através de um dos três modelos disponibilizados pelo HEC-HMS.
Derivação – <i>Diversion</i> 	A Derivação é usada para modelar o fluxo de vazão que sai do canal principal. A entrada da derivação pode vir de um ou mais elementos a montante. A saída do elemento de derivação consiste no fluxo desviado e não desviado. O fluxo desviado é calculado usando dados de entrada definidos pelo usuário. Os dois métodos de derivação podem ser conectados aos elementos hidrológicos a jusante.

Fonte: Adaptado de USACE (2022a).

Já os processos hidrológicos (como perdas, transformação e propagação de vazão) são aplicados aos Elementos de sub-bacia e trecho. A Tabela 7 apresenta em detalhes os modelos disponíveis no HEC-HMS.

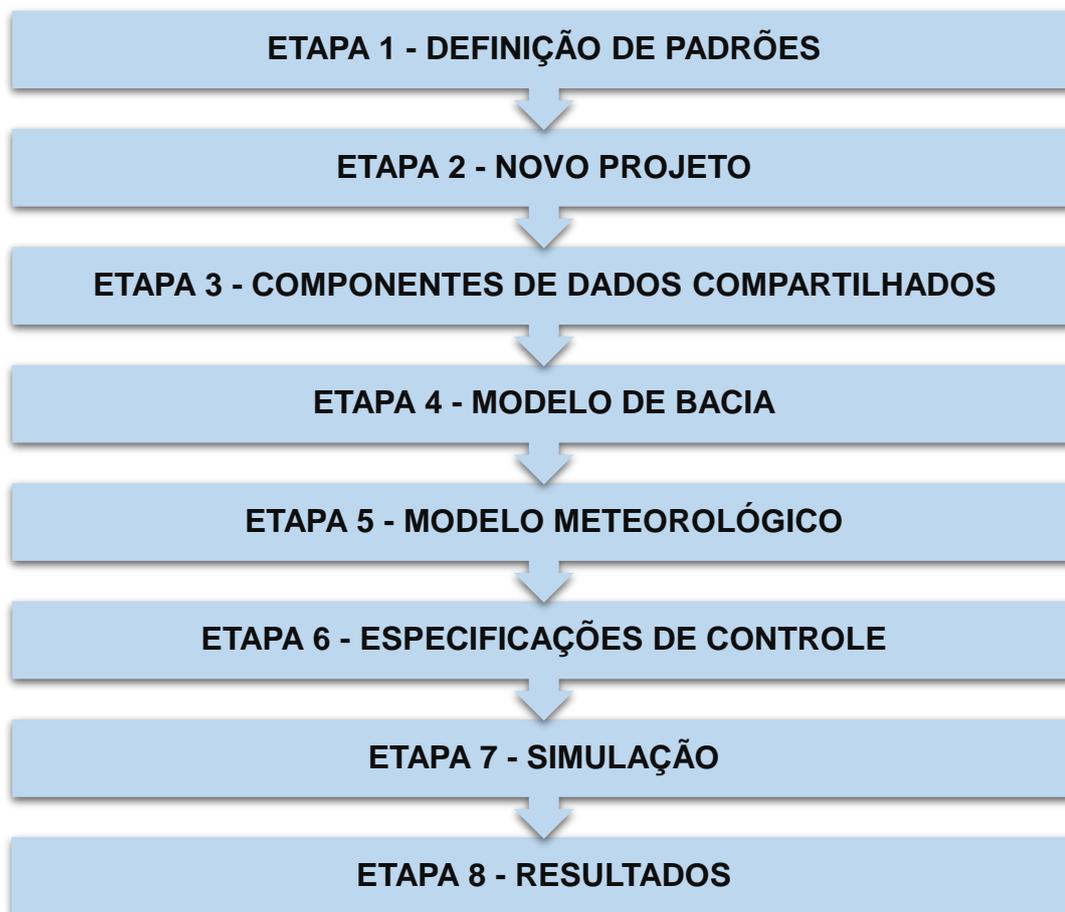
Tabela 7 – Modelos disponíveis para os elementos *subbasin* e *reach*.

Elemento Hidrológico	Processo Hidrológico	Modelo
Sub-bacia – <i>Subbasin</i> 	Canopy - Representa a presença de plantas que podem interceptar a precipitação.	Dynamic Simple (also gridded)
	Surface - Representa a superfície do solo onde a água pode se acumular.	Simple (also gridded)
	Loss - Representa as perdas.	Deficit and constant (also gridded) Exponential Green and Ampt (also gridded) Initial and constant SCS curve number (also gridded) Smith Parlange Soil moisture accounting (also gridded)
		Clark unit hydrograph Kinematic wave ModClark SCS unit hydrograph Snyder unit hydrograph User-specified s-graph User-specified unit hydrograph
	Transform - Representa o processo de transformação chuva-vazão.	Bounded recession Constant monthly Linear reservoir Nonlinear Boussinesq Recession
	Baseflow - Representa o escoamento de base.	
Trecho – <i>Reach</i> 	Routing - Representa a propagação de vazão.	Kinematic wave Lag Modified Puls Muskingum Muskingum-Cunge Straddle stagger
	Gain/Loss - Representa os ganhos e as perdas a partir de interações com o subsolo.	Constant Percolation

Fonte: Adaptado de USACE (2022a).

Apesar de o programa ter sido projetado de modo a garantir certa independência entre as etapas para a realização de simulações, o Manual do Usuário (USACE, 2022a), no item “*Application Steps*”, apresenta um fluxograma de trabalho para o HEC-HMS, que foi adaptado conforme mostra a Figura 9, sendo detalhado logo em seguida.

Figura 9 – Fluxo de trabalho para realizar uma simulação no HEC-HMS.



Fonte: Adaptado de USACE (2022a).

- Etapa 1 – DEFINIÇÃO DE PADRÕES: Nesta etapa são definidos os padrões que serão utilizados na modelagem hidrológica (separador decimal, fonte, sistema de unidades etc.). É realizado através da opção na Barra de Menu *Tools > Program Settings*;
- Etapa 2 – NOVO PROJETO: Aqui é feito a criação de um novo projeto através das opções *File > New*, onde são definidos o nome, a descrição e o diretório de armazenamento do projeto;
- Etapa 3 – COMPONENTE DE DADOS COMPARTILHADOS: Nesta etapa são

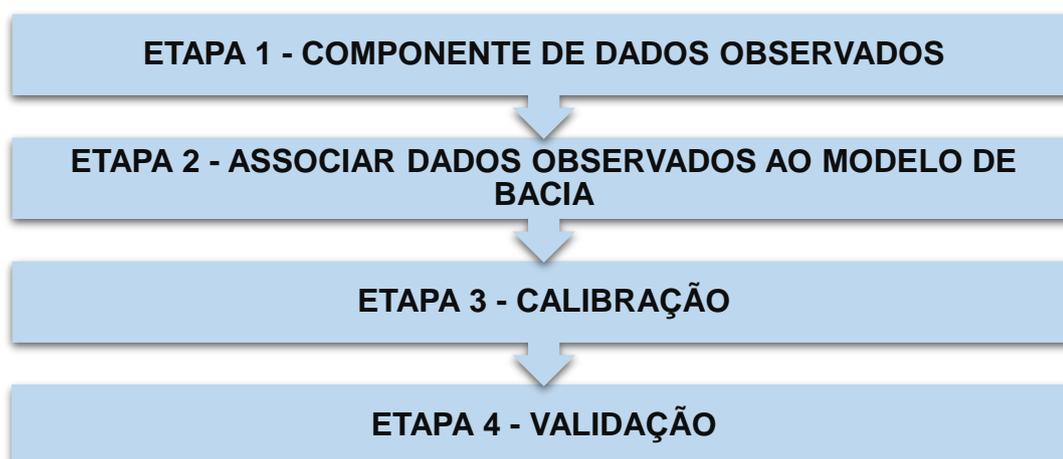
inseridas as séries de dados temporais a serem utilizadas na modelagem (precipitação e vazão, no caso do presente trabalho) através da opção *Components > Time-Series Data Manager*.

- Etapa 4 – MODELO DE BACIA: Nesta etapa é feita a criação e configuração do modelo de bacia através da opção *Menu > Basin Model Manager > New*. Após a criação do Modelo de Bacia, o usuário é responsável por adicionar os Elementos Hidrológicos (Tabela 6), fazendo a configuração dos processos hidrológicos atuantes e a conexão entre os elementos conforme o fluxo de escoamento da bacia;
- Etapa 5 – MODELO METEOROLÓGICO: Nesta etapa é definido o modelo que realizará o cálculo da precipitação, é criado através do menu *Components > Meteorologic Model Manager*. No caso de a precipitação ser inserida diretamente através de uma série de dados de chuva médio para a bacia, utiliza-se a opção *Specified Hyetograph* para apontar a série de precipitação introduzida na etapa 3;
- Etapa 6 – ESPECIFICAÇÕES DE CONTROLE: Aqui é definido o intervalo de simulação, contendo a data e hora inicial e final, através da opção *Components > Control Specifications Manager*. É importante que haja dados de entrada na série temporal do modelo meteorológico durante todo o período definido para a simulação;
- Etapa 7 – SIMULAÇÃO: Primeiro é criada uma simulação através do menu *Compute > Create Compute > Simulation Run*, onde se associa o modelo de bacia, o modelo meteorológico e o intervalo de simulação criados nas etapas anteriores. A simulação é executada através do menu *Compute > Multiple Compute* ou através da guia *Compute* no painel Explorador de Bacia Hidrográfica;
- Etapa 8 – RESULTADOS: Os resultados podem ser acessados através da guia *Results* do painel Explorador de Bacia Hidrográfica que estarão disponíveis contanto que a simulação tenha sido executada com sucesso. Aqui é possível observar gráficos e tabelas contendo o hidrograma de vazão produzido, por exemplo.

O HEC-HMS também possibilita a calibração do modelo através de índices de desempenho (NSE, RSR, Pbias) de forma automática e de forma manual (ajuste por tentativa). Para a forma automática é necessário a criação de uma simulação de otimização através de o menu *Compute > Create Compute > Optimization Trial*, a partir do qual é possível apontar quais parâmetros serão otimizados, conforme explicado em detalhes no capítulo *Model Optimization*, do Manual do Usuário (USACE, 2022a).

Apesar de possibilitar a calibração automática do modelo, a forma manual traz vantagens, como a possibilidade de o usuário visualizar mais claramente como as variáveis influenciam nos resultados. O fluxograma de trabalho para a realização da calibração manual (por tentativa) é exibido na Figura 10 e detalhado a seguir:

Figura 10 – Fluxograma para calibração do modelo no HEC-HMS



Fonte: Adaptado de USACE (2022a).

- Etapa 1 – COMPONENTE DE DADOS OBSERVADOS: Na etapa inicial é adicionado ao modelo a série de dados observados de vazão através da opção *Components > Time-Series Data Manager > Discharge Gage*;
- Etapa 2 – ASSOCIAR DADOS OBSERVADOS AO MODELO DE BACIA: Aqui é feita a associação da série de dados adicionada na etapa anterior com o Elemento Hidrológico que representa o ponto onde os dados de vazão foram observados (comumente associado ao elemento *Sink*). Para tal, seleciona-se o elemento escolhido na Área de Trabalho ou no Explorador de Bacia Hidrográfica e, no painel Editor de Componentes, na aba *Options*, é feita a associação através do item *Observed Flow*;

- Etapa 3 – CALIBRAÇÃO: Após realizar a simulação, na aba *Results* do Elemento Hidrológico escolhido para receber os dados observados, é feita a consulta dos coeficientes de desempenho na *Summary Table*. Deve ser feito o ajuste dos parâmetros do modelo e refeita a simulação até que se atinja valores de coeficientes dentro de um intervalo desejado (com a utilização das metodologias descritas no item 3.3.1.5, por exemplo);
- Etapa 4 – VALIDAÇÃO: Para validar o modelo, a simulação é realizada para outros eventos na mesma bacia e sob as mesmas condições do evento de calibração. Em seguida, é verificado se os coeficientes de desempenho para esses eventos também se encontram dentro de um intervalo desejado.

### 3.3.2 Modelos hidrodinâmicos

Os modelos hidrodinâmicos simulam o comportamento de uma bacia hidrográfica com foco nas características hidráulicas do escoamento, sendo capazes de analisar situações como o nível d'água, a velocidade de escoamento, espalhamento da mancha de inundação, vazão sob influência de remanso etc.

Batista e Ribeiro Neto (2022) realizaram modelagem hidrodinâmica 2D com o auxílio do *software* HEC-RAS para simular a inundação no município de Palmares, no estado de Pernambuco, considerando diferentes períodos de retorno com o objetivo de estimar os danos aos imóveis da área urbana e calcular as perdas monetárias.

Ongdas *et al.* (2020) utilizaram o HEC-RAS para performar uma simulação hidrodinâmica 2D de diferentes cenários de inundação no rio Yesil, no Cazaquistão. Com isso, os autores conseguiram definir quais assentamentos correm riscos de serem atingidos por inundações.

Os itens a seguir detalham as características e formulações utilizadas em modelos hidrodinâmicos, com enfoque no programa HEC-RAS (USACE, 2022b).

#### 3.3.2.1 Classificação de modelos hidráulicos

Segundo Azevedo Netto e Fernández (2015), os modelos hidráulicos podem ser classificados quanto a sua dinâmica temporal: regime permanente, quando o vetor velocidade do escoamento não se altera em grandeza e direção ao longo do tempo

numa determinada seção transversal de um líquido em movimento; e não permanente (transiente) quando há alteração nesse vetor velocidade.

Quanto a variação espacial, o escoamento pode ser classificado em uniforme e variado (não uniforme). Quando as características hidráulicas não variam de uma seção para outra, o escoamento é dito uniforme. Caso contrário, quando há a alteração das características hidráulicas, o escoamento é chamado de não uniforme ou variado (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015).

O escoamento variado ainda pode ser subdividido em gradual e brusco (rápido). Quando as características hidráulicas variam de forma lenta, gradual, o escoamento é dito como gradualmente variado, já quando as características variam de forma brusca, repentina, diz-se que o escoamento é bruscamente variado (CIRILO *et al.*, 2014a).

Segundo Campos (2009), o regime permanente uniforme acontece em canais prismáticos de grande comprimento, onde há espaço suficiente para eliminar influências da estrutura de saída à jusante, como ocorre em longos canais de irrigação. Enquanto o regime permanente variado pode ser observado à montante de obras como vertedores e barragens, por exemplo. Ainda o mesmo autor especificou que o regime não permanente variado é o mais encontrado em estruturas hidráulicas e, geralmente, o único que acontece em rios e riachos naturais. Já o regime não permanente uniforme não pode ser encontrado na natureza.

O escoamento gradualmente variado está associado a transições mais suaves, como os trechos iniciais e finais de canais prismáticos. Por outro lado, o escoamento bruscamente variado ocorre em estruturas hidráulicas, tais como vertedouros, comportas, dissipadores de energia, degraus, obstáculos etc. (CIRILO *et al.*, 2014a). Adicionalmente, Porto (2006) elaborou um esquema resumindo as possibilidades de classificação do escoamento hidráulico em condutos livres, que pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Classificação dos escoamentos em condutos livres.



Fonte: Adaptado de Porto (2006).

### 3.3.2.2 Equações de águas rasas

Conforme Neves (2019), o movimento dos fluídos em três dimensões em modelos hidráulicos é descrito pelas equações diferenciais parciais de continuidade (conhecida como equações de conservação de massa) e da quantidade de movimento (também chamada de conservação de momento) de Navier-Stokes.

Uma simplificação muito comum utilizada para escoamento em duas dimensões são as Equações de Águas Rasas, que surgem a partir das seguintes simplificações:

- Fluxo incompressível;
- Densidade uniforme;
- Pressão hidrostática;
- Dimensão horizontal é muito maior que a dimensão vertical;
- Equações médias de Reynolds (Viscosidade turbulenta); e
- Ausência da força do vento.

As equações de águas rasas em duas dimensões podem ser vistas a seguir, sendo a Equação (21) a da continuidade e as Equações (22) e (23) as da quantidade de movimento.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -g \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -g \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (23)$$

Onde:  $H$  – elevação (cota) da superfície da água;  $t$  – tempo;  $h$  – altura da lâmina de água;  $u$  e  $v$  – são as componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $q$  – fluxo de entrada/saída;  $g$  – aceleração da gravidade;  $\nu_t$  – coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal;  $c_f$  – coeficiente de atrito; e  $f$  – parâmetro de Coriolis.

A forma vetorial da Equação (21) é apresentada na Equação (24), a seguir:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (24)$$

Onde  $V=(u,v)$  – vetor velocidade e  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  – vetor operador de derivadas parciais.

As Equações (22) e (23) também podem ser reescritas na forma vetorial, em uma única equação. A forma vetorial das equações de quantidade de movimento é apresentada na Equação (25)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + \nu_t \nabla^2 V - c_f V + f k \times V \quad (25)$$

Onde  $k$  é o vetor unitário na direção vertical.

Da esquerda para a direita da Equação (25), temos que cada termo representa: aceleração local, aceleração advectiva, gradiente de pressão, difusão devido à turbulência, atrito e termo de Coriolis.

A partir das equações de Águas Rasas é possível se obter as equações bidimensionais da onda de difusão, para tal admite-se que os termos dominantes são a pressão e o atrito, de modo a desconsiderar os demais, e com a utilização da equação de Chézy com o coeficiente de Manning, temos:

$$V = - \frac{(R(H))^{\frac{2}{3}} \nabla H}{n |\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

Onde  $R$  – raio hidráulico; e  $n$  – coeficiente de Manning.

Finalmente, ao se substituir a Equação (26) diretamente na equação da continuidade (Equação (24)), obtém-se a forma diferencial clássica do modelo conhecido como Equações de Onda Difusa de Águas Rasas, expresso conforme a Equação (27), a seguir:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (27)$$

Onde:

$$\beta = \frac{(R(H))^{\frac{5}{3}}}{n |\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (28)$$

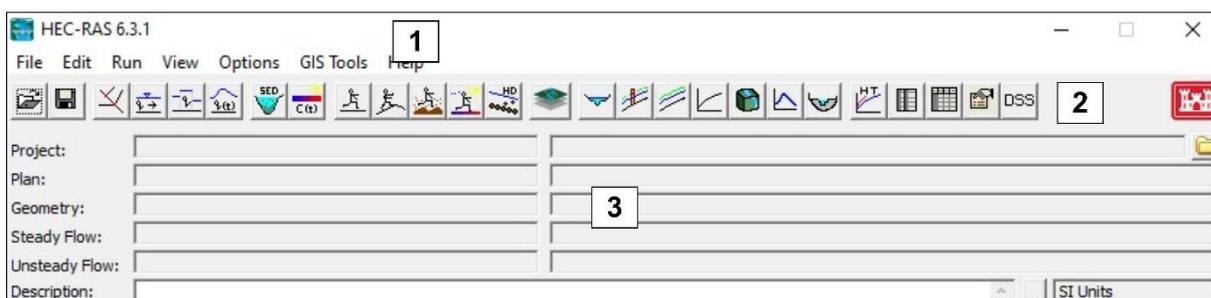
### 3.3.2.3 HEC-RAS

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) é um programa de simulação hidrodinâmica de livre acesso desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2022b) que permite realizar cálculos hidráulicos em 1D, 2D e acoplado 1D/2D, com regime de escoamento permanente, quase não permanente e não-permanente. Além disso, o modelo permite a modelagem de qualidade da água, transporte de sedimentos, avaliação do efeito de estações de bombeamento e de estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, pontes, entre outras.

Nas simulações em regime não-permanente, o HEC-RAS utiliza as equações de Saint-Venant para o fluxo em 1D e as equações bidimensionais de Águas Rasas ou as equações da Onda Difusa para o fluxo em 2D.

A interface gráfica da tela principal do HEC-RAS versão 6.3.1 está apresentada na Figura 12, sendo composta basicamente pelas Barras de Título e de Menu (1), Barra de Botões (2) e pelo painel de Dados de Projeto (3).

Figura 12 – Interface gráfica principal do HEC-RAS 6.3.1.



Fonte: Adaptado de USACE (2022b).

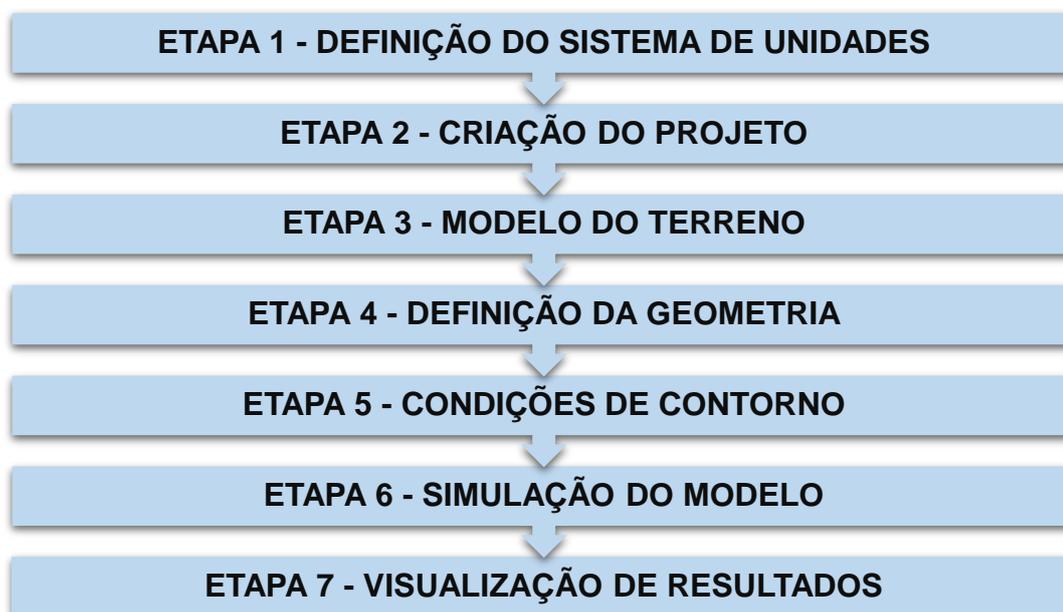
Conforme o Manual do Usuário do HEC-RAS 6.3.1 (USACE, 2022b), a Barra de Menu fornece acesso as opções básicas para utilização do programa, como de gerenciamento de arquivos (abrir e salvar projetos, importar e exportar dados etc.), opções de edição de dados, para executar cálculos hidráulicos, visualização de resultados, configurações gerais do programa, entre outras.

A Barra de Botões fornece acesso rápido as funções utilizadas com mais frequência na Barra de Menu.

O painel de Dados do Projeto apresenta os arquivos utilizados no modelo. O *Project* é o arquivo que contém o título do projeto, o sistema de unidades, variáveis padrão e a listagem de arquivos associados, o *Plan* contém o arquivo que armazena as opções de simulação (como o passo de tempo e o período de simulação), o item *Geometry* armazena os dados de geometria do modelo, *Steady Flow* e *Unsteady Flow* contém os dados e as condições de contorno referente ao regime de escoamento permanente e não-permanente, respectivamente.

No item *Working with HEC-RAS*, do Manual do Usuário (USACE, 2022b), está apresentado as etapas de trabalho para as simulações hidrodinâmicas, as informações contidas nessa seção do manual foram resumidas no fluxograma apresentado na Figura 13 e detalhadas nos itens a seguir:

Figura 13 – Fluxograma de trabalho HEC-RAS.



Fonte: Adaptado de USACE (2022b).

- Etapa 1 – DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE UNIDADES: Na primeira etapa é definido o sistema de unidades padrão do sistema através do menu *Options > Unit System*, tipicamente utiliza-se o Sistema Internacional (SI);
- Etapa 2 – CRIAÇÃO DO PROJETO: Nessa etapa é criado o arquivo *Project* através do menu *File > New*, onde é definido o nome e o diretório de armazenamento do projeto;
- Etapa 3 – MODELO DO TERRENO: Utilizando a ferramenta *RAS Mapper* (acessada através do menu *GIS Tools*), é criado o modelo do terreno a ser utilizado na modelagem, para tal, primeiramente é configurado a projeção e em seguida o terreno é criado a partir de um arquivo MDT;
- Etapa 4 – DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA: Nesta etapa é criada a geometria do projeto, para uma modelagem 2D é necessário definir a malha computacional, além de regiões de refinamento e *breaklines*. Nesta etapa também podem ser inseridas estações de bombeamento e estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, comportas, diques, pontes e bueiros;
- Etapa 5 – CONDIÇÕES DE CONTORNO: Nesta etapa é definido o tipo de regime de escoamento (*Steady Flow – Permanente, Quasi Unsteady Flow –*

Quase não-permanente e *Unsteady Flow* – Não-permanente), em seguida, as condições de contorno para o tipo de escoamento escolhido podem ser definidas;

- Etapa 6 – SIMULAÇÃO DO MODELO: No menu *Run* é possível acessar o painel de simulação, nesta etapa é criado o arquivo *Plan*, onde é definido o intervalo de simulação, além de associar com os arquivos criados nas etapas de Geometria e Condição de Contorno para possibilitar a realização dos cálculos computacionais;
  - Etapa 7 – VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS: Os diversos tipos de resultados, como lâmina d'água em seções transversais definidas, perfil longitudinal, mapas de espalhamento da mancha de inundação, gráficos e tabelas podem ser acessados através da Barra de Menu ou ainda visualizados no *RAS Mapper*.

### 3.4 DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

Para se obter uma modelagem hidrodinâmica que representa corretamente a realidade observada, é de fundamental importância representar o mais fielmente possível os parâmetros físicos do ambiente estudado. Mesmo que bases altimétricas globais, como a base do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sejam amplamente difundidas em diversos estudos, os produtos de MDT com resolução espacial de 30 m e 90 m não são adequados para representar o terreno em simulações hidrodinâmicas 2D.

O estudo realizado por Yalcin (2020) avaliou a importância de dados espaciais de alta resolução para representação do terreno existente na modelagem hidrodinâmica para análise de perigo de inundação em áreas urbanas. O autor concluiu que dados topográficos com resolução menor que 2 m são indispensáveis para a produção de simulações 2D para a modelagem de inundações urbanas com o uso do HEC-RAS. De modo semelhante, o estudo realizado por Ureta *et al.* (2020) apontou que se a resolução do MDT não for alta o suficiente, o mapa de inundação pode ser superestimado.

Nesse contexto, a tecnologia de perfilamento a laser, denominada de LiDAR (*Light Detection and Ranging*), tem despontado na produção de modelos digitais do terreno para uso em modelagem hidrodinâmica. O trabalho de Hohenthal *et al.* (2011)

relatou que dados topográficos obtidos a partir da tecnologia LiDAR são tidos com os mais confiáveis para modelagens hidrológicas, devido à sua alta resolução horizontal e precisão vertical.

A tecnologia de perfilamento a laser consiste na emissão de um feixe de lasers infravermelho, com o auxílio de um espelho de varredura, em direção aos objetos terrestres. Uma vez conhecida a frequência de emissão dos feixes e a posição precisa do equipamento no instante em que o pulso é emitido, é possível calcular as elevações do terreno (RENSLOW, 2012).

O resultado do perfilamento a laser é uma nuvem de pontos cotados, distribuídos aleatoriamente sobre o terreno. É possível transformar a nuvem de pontos em uma superfície TIN (*Triangular Irregular Network* ou Redes Triangulares Irregulares), onde cada ponto torna-se um vértice de um triângulo, ou a partir de métodos de interpolação, em grades regulares de pontos. Quando a transformação é realizada considerando todos os pontos obtidos no mapeamento, incluindo vegetação, edificações, pontes, barragens ou linhas de transmissão, o resultado proveniente é chamado de Modelo Digital de Elevação (MDE). Quando a nuvem de pontos é filtrada, através de algoritmos e/ou ajustes manuais, para remoção destes elementos sobre a superfície do terreno de modo que reste apenas o terreno natural (ou superfície primitiva), esse produto recebe o nome de Modelo Digital de Terreno (MDT) (PETZOLD *et al.*, 1999; BRANDALIZE, 2019).

No estado de Pernambuco, foi criado o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), iniciado no ano de 2014, o programa consiste na varredura do território pernambucano utilizando aerofotogrametria e perfilamento a laser. Inicialmente, o mapeamento foi realizado no território das bacias do rio Una, Mundaú e Sirinhaém, regiões que foram atingidas por grandes enchentes nos anos de 2010/2011. O mapeamento dessa região permitiu a elaboração de barragens de controle de cheias (a exemplo da Barragem Serro Azul no município de Palmares, PE), também permitiu o desenvolvimento de modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica e identificação de áreas de risco (CIRILO *et al.*, 2014b). Posteriormente, o Programa foi estendido para o restante do território pernambucano.

Segundo Alves (2017), a captura de dados para o PE3D foi realizada por sensores e câmeras instaladas em oito aeronaves tripuladas que mapearam todos os 98.149 km<sup>2</sup> do território pernambucano. O estado de Pernambuco foi subdividido em 13.115 folhas, articuladas e agrupadas em cinco blocos (Figura 14).

Foram realizados dois mapeamentos, um na escala 1:5.000 contemplando todo o estado de Pernambuco e outro numa escala mais refinada de 1:1.000 para a área urbana das sedes de 26 municípios, selecionados em função do andamento de projetos para implantação ou ampliação de redes de abastecimento de água e/ou redes de coleta de esgotamento sanitário (NEVES, 2019). Todos os produtos são referenciados para o sistema de projeção SIRGAS2000, fuso 24S ou 25S. A Tabela 8 apresenta as informações técnicas dos produtos do PE3D.

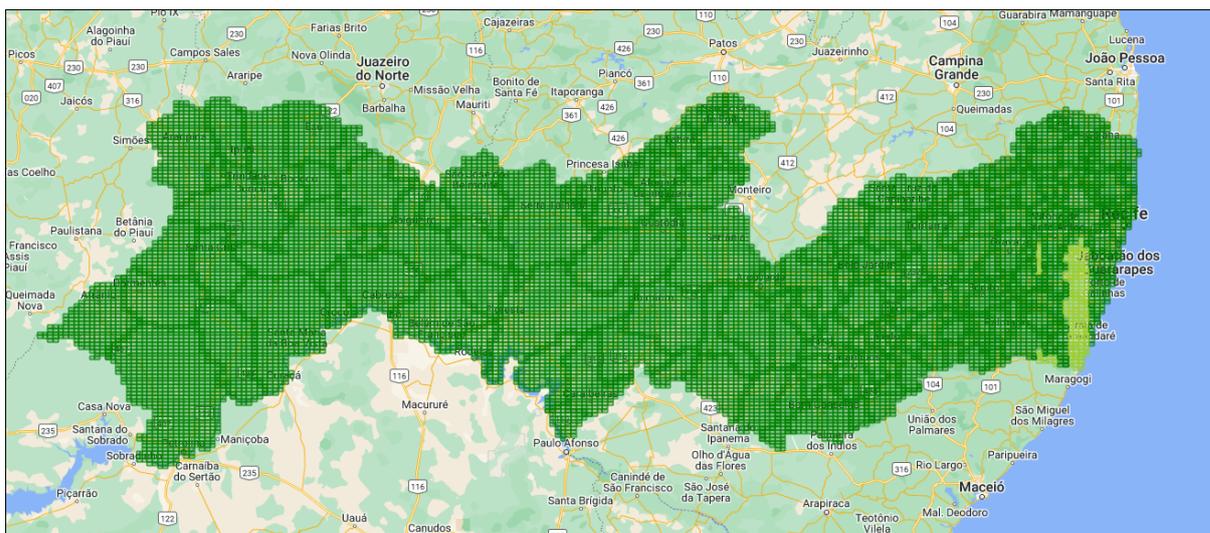
Tabela 8 – Informações técnicas dos produtos do PE3D.

Características	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento Laser	Ortofoto	Perfilamento Laser
Extensão dos arquivos	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m <sup>2</sup>	-	~ 4 pontos/m <sup>2</sup>
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	32 bits	8 bits	32 bits
Precisão planimétrica	~ 1 m	-	~ 25 cm	-
Precisão altimétrica*	-	25 cm	-	10 cm
Altura média de voo	4.800 m	2.800 m	700 m	700 m

\*A precisão altimétrica dos produtos 1:5000 tem como referência o MAPGEO 2010, enquanto os produtos 1:1000 são referenciados segundo Referências de Nível (RN's) do IBGE.

Fonte: Adaptado de Alves (2017).

Figura 14 – Divisão do estado em quadrículas do mapeamento PE3D.



Fonte: Pernambuco (2023).

Os produtos do PE3D vêm sendo utilizados em diversos estudos referentes a modelagens hidrodinâmicas e avaliação de manchas de inundação em áreas urbanas.

Ribeiro Neto *et al.* (2016) aplicaram os produtos do PE3D para a modelagem hidrodinâmica 2D na simulação de inundações para o município de Ipojuca – PE. As manchas de inundação produzidas se mostraram compatíveis com os levantamentos de campo. Com o resultado da modelagem, foi possível se obter mapas indicadores de perigo de inundação para o entorno do rio Ipojuca, fundamental para a melhor gestão do uso e ocupação do solo na área urbana do município. Outro importante estudo foi o de Alves *et al.* (2017) quando utilizaram o MDT produzido pelo programa PE3D para a simulação 2D das inundações de 2010 na área urbana das cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros, na Zona da Mata Sul de Pernambuco. O modelo bidimensional conseguiu reconstruir com precisão a mancha de inundação que atingiu as cidades durante esse evento extremo.

Neves (2019) utilizou os dados altimétricos do PE3D para realizar uma simulação hidrodinâmica acoplada 1D/2D da bacia hidrográfica do rio Morno, principal contribuinte da bacia do Beberibe, na região metropolitana do Recife (RMR). O autor também utilizou a ortofoto do PE3D para, através de classificação supervisionada, obter a caracterização do uso e ocupação do solo. Através do modelo hidrodinâmico, foi possível se obter mapas com indicadores de perigo de inundação para o entorno do rio Morno.

Batista *et al.* (2020) aplicaram o MDT e o MDE do PE3D na análise do dano à imóveis devido a inundação ocorrida em 2010 na bacia do rio Pirapama, na RMR. O uso do MDE acoplada a técnicas de geoprocessamento foi fundamental na identificação dos imóveis atingidos pela mancha de inundação obtida através de modelagem hidrodinâmica 2D com o uso do *software* HEC-RAS. Ainda pode-se assinalar Gomes *et al.* (2021) que aplicaram os dados do PE3D na modelagem hidrodinâmica do sistema de macrodrenagem da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. O trabalho focou em simular os eventos de cheia dos anos de 1975 e 2011 na cidade do Recife, levando em consideração o sistema de controle de cheias que foi instalado entre as duas datas nessa bacia. O modelo foi capaz de simular com acurácia o comportamento da mancha de inundação nos dois cenários.

### 3.5 MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

O perigo é um fenômeno natural que se refere a probabilidade de um evento ou processo natural potencialmente danoso ocorrer em um certo lugar, em um determinado momento (TOMINAGA *et al.*, 2009). Tendo em vista esse conceito, para se avaliar o risco de inundação em uma determinada região existem diversas metodologias propostas na literatura que combinam as variáveis profundidade e velocidade da água.

Kreibich *et al.* (2009) relacionaram algumas variáveis resultantes da combinação da profundidade da água e da velocidade de escoamento com o dano estrutural a infraestrutura, a casas, perdas financeiras e interrupção de negócios. Os autores sugerem os seguintes indicadores:

$$\text{Energia da água (m)} = y + v^2 / 2g \text{ (m)} \quad (29)$$

$$\text{Força do escoamento (m}^3\text{/s}^2\text{)} = y * v^2 \quad (30)$$

$$\text{Intensidade (m}^2\text{/s)} = v * y \quad (31)$$

Onde  $y$  é a profundidade da água (m),  $v$  é a velocidade de escoamento (m/s) e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

De maneira semelhante, Wright (2008) criou classes para os indicadores de perigo mencionados com base em faixas de valores, de modo que cada indicador possua três níveis de severidade: baixo, médio ou alto risco. Segundo o autor, valores de profundidade da água maiores que 0,6 m e velocidade da água acima de 1,2 m/s apresentam um risco definitivo para as pessoas.

Kreibich *et al.* (2009) também associaram faixas de valores para os indicadores derivados da combinação de velocidade e profundidade da água e, associou cada faixa a um grau de severidade de perigo. Conforme o autor, o valor de energia da água de 2 m, o valor de força do escoamento de  $2 \text{ m}^3/\text{s}^2$  e o valor de  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$  para a intensidade já representam um risco significativo para edificações, infraestrutura e pessoas. De maneira mais específica, esses mesmos autores argumentaram que cada tipo de indicador de perigo associado a inundações possui determinada influência a um certo tipo de dano geralmente ocasionado em eventos do tipo, a Tabela 9 apresenta essa relação.

Tabela 9 – Influência dos indicadores de perigo aos danos da inundação.

Indicador de Perigo	Tipo de dano				
	Dano estrutural a edifícios residenciais	Dano estrutural as estradas	Perdas monetárias devido a construções residenciais	Perdas monetárias devido as estradas	Interrupção do comércio
Velocidade de escoamento	Nenhum	Forte	Fraco	Nenhum	Nenhum
Profundidade da água	Forte	Médio	Médio	Nenhum	Médio
Energia específica	Forte	Médio	Médio	Nenhum	Fraco
Força do escoamento	Fraco	Forte	Fraco	Nenhum	Nenhum
Intensidade	Fraco	Forte	Fraco	Nenhum	Fraco

Fonte: Adaptado de Kreibich *et al.* (2009).

O trabalho de Ribeiro Neto *et al.* (2016) compilou essas metodologias e atribuiu três faixas de valores para cada indicador com base nos trabalhos dos autores supracitados, além disso, os autores criaram um indicador de perigo definido como a

média aritmética entre a classificação da profundidade e da velocidade. Para tal, foi atribuído o valor 1 (baixo), 2 (médio) e 3 (alto) para cada pixel dos *rasters* de profundidade e velocidade resultantes da modelagem hidrodinâmica através do uso de ferramenta SIG (como o QGIS, por exemplo). Em seguida, foi calculado uma média dos resultados obtidos nessa classificação, caso o resultado seja um número fracionado é feito o arredondamento para o número inteiro imediatamente acima (por exemplo,  $(3 + 2) / 2 = 2,5$ , logo, utiliza-se o valor 3). A Tabela 10 apresenta as faixas de valores que definem os indicadores de perigo em baixo, médio ou alto.

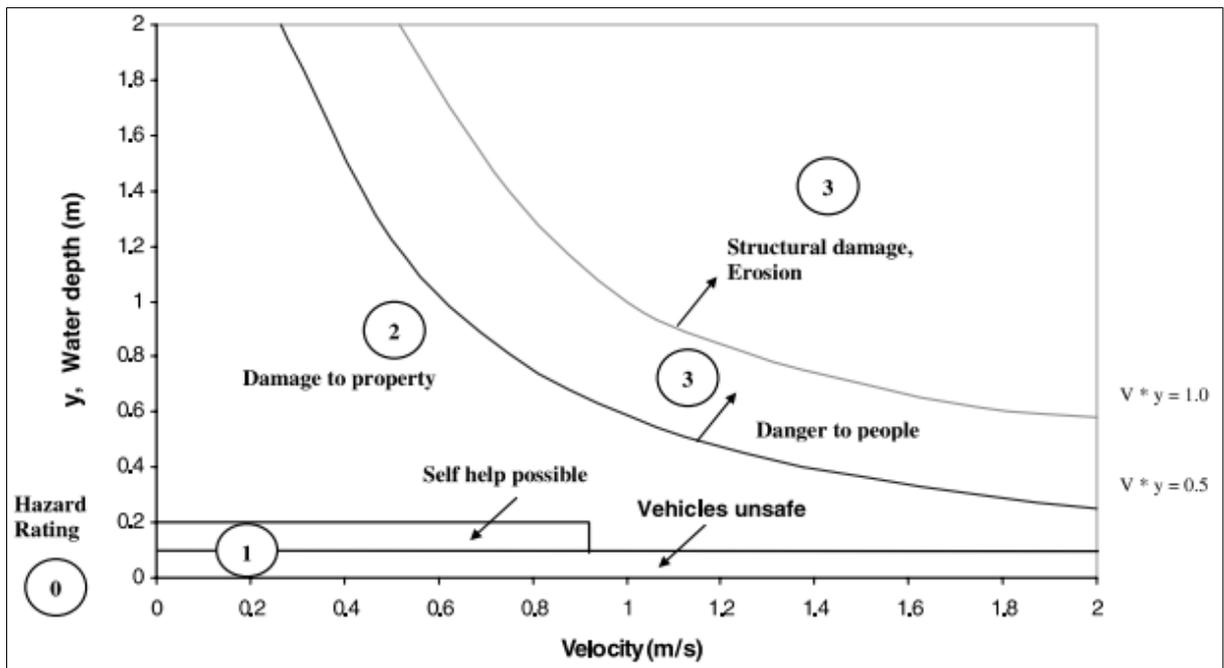
Tabela 10 – Faixas dos indicadores de perigo de inundação.

<b>Indicador</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>
Profundidade da água (m)	0 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Velocidade do escoamento (m/s)	0 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Energia da água (m)	0 - 1,00	1,00 - 2,00	> 2,00
Força do escoamento (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	0 - 1,00	1,00 - 2,00	> 2,00
Intensidade (m <sup>2</sup> /s)	0 - 0,36	0,36 - 1,50	> 1,50
Média profundidade e velocidade	1	2	3

Fonte: Adaptado de Ribeiro Neto *et al.* (2016).

Outra classificação referente a perigo de inundação é a proposta por Stephenson (2002), sendo essa uma metodologia que utilizou testes empíricos para determinar a classe de perigo baseada na combinação da profundidade da água e da velocidade de escoamento. Essa metodologia é utilizada por diversas organizações de gerenciamento de inundação pelo mundo, como no estado de Minnesota nos Estados Unidos da América e New South Wales, na Austrália. Esse autor idealizou o diagrama de perigo de inundação (Figura 15) onde classificou para valores do produto entre a profundidade da água e a velocidade de escoamento até 0,5 m<sup>2</sup>/s já há o perigo de danos a propriedade, a veículos não seguros e a possibilidade de autoajuda, entre 0,5 m<sup>2</sup>/s e 1 m<sup>2</sup>/s já há o perigo para as pessoas e valores acima de 1 m<sup>2</sup>/s já existe o perigo de dano estrutural e erosão.

Figura 15 – Diagrama de perigo de inundação – profundidade x velocidade.



Fonte: Stephenson (2002).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está caracterizada a área de estudo e são conceituados os materiais e metodologias, de maneira detalhada, utilizadas na modelagem hidrológica e hidrodinâmica realizadas no presente trabalho.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

Neste item será detalhado a da área de estudo do presente trabalho, considerando a sua localização geográfica, divisões territoriais os aspectos fisiográficos e climáticos. Além disso, será apresentado um enfoque para a sede urbana do município de Vitória de Santo Antão.

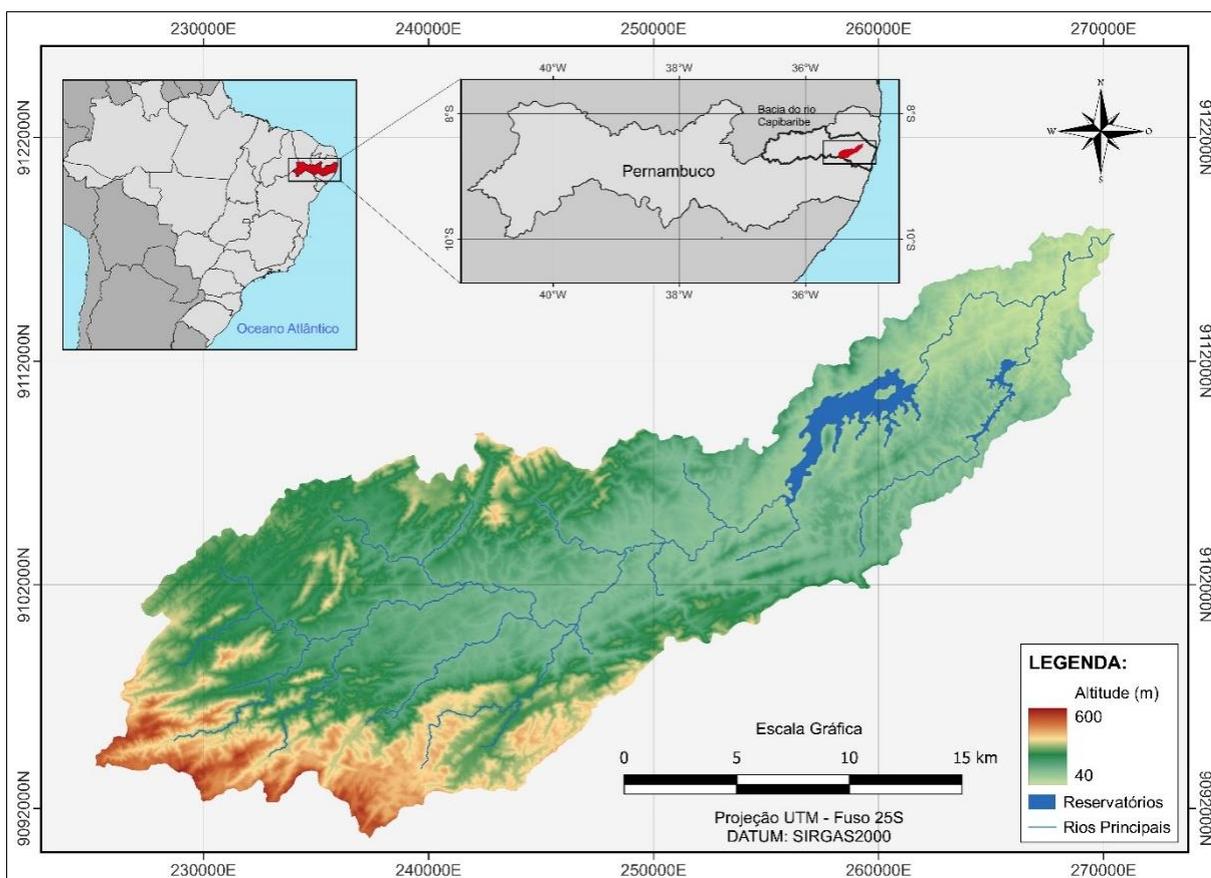
#### 4.1.1 Localização e aspectos fisiográficos

A Bacia Hidrográfica do Tapacurá está localizada, em sua maior parte, na Zona da Mata de Pernambuco, na região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 225.185 mE, 270.505 mE, e 9.090.336 mN, 9.118.045 mN, no fuso 25 S (Figura 16).

Possuindo uma área de drenagem de 467,57 km<sup>2</sup>, com 16 cursos d'água, onde o principal deles (o rio Tapacurá) possui o curso d'água com aproximadamente 61 km de extensão, conforme dados da base de Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil (IBGE,2021), o rio Tapacurá é um importante afluente da Bacia Hidrográfica do Capibaribe.

Dentre os afluentes do Rio Tapacurá, recebem destaque o Rio Natuba e os riachos Ronda, Pacas e Mocotó (ÁLVARES *et al.*, 2010). O Reservatório de Tapacurá é o mais importante da bacia, tendo sido construído na década de 1970, no município de São Lourenço da Mata, possui capacidade de armazenamento de 94,2 milhões de m<sup>3</sup>. Esse reservatório possui a finalidade de controle de enchentes no Rio Capibaribe, evitando inundações na cidade do Recife, além de reforçar o abastecimento para a população da região metropolitana do Recife, atendendo as cidades de Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes, Recife e São Lourenço da Mata (SANTOS, 2010; BRAGA *et al.*, 2020).

Figura 16 – Localização da Bacia do rio Tapacurá.



Fonte: O Autor (2023).

A região da bacia do rio Tapacurá possui clima quente e úmido do tipo tropical, do tipo  $As'$ , conforme a classificação climática de Köppen. O regime pluviométrico anual da região varia de 800 mm na porção mais a oeste da bacia, inserida no agreste pernambucano com características semiáridas, até 1.650 mm na porção mais a leste, inserida na Zona da Mata Sul de Pernambuco (SILVA *et al.*, 2012). O período chuvoso ocorre entre os meses de março a julho, com médias mensais de temperatura variando entre 23 e 27 °C e com umidade relativa do ar superior a 75% nos meses de maio até agosto (DUARTE, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

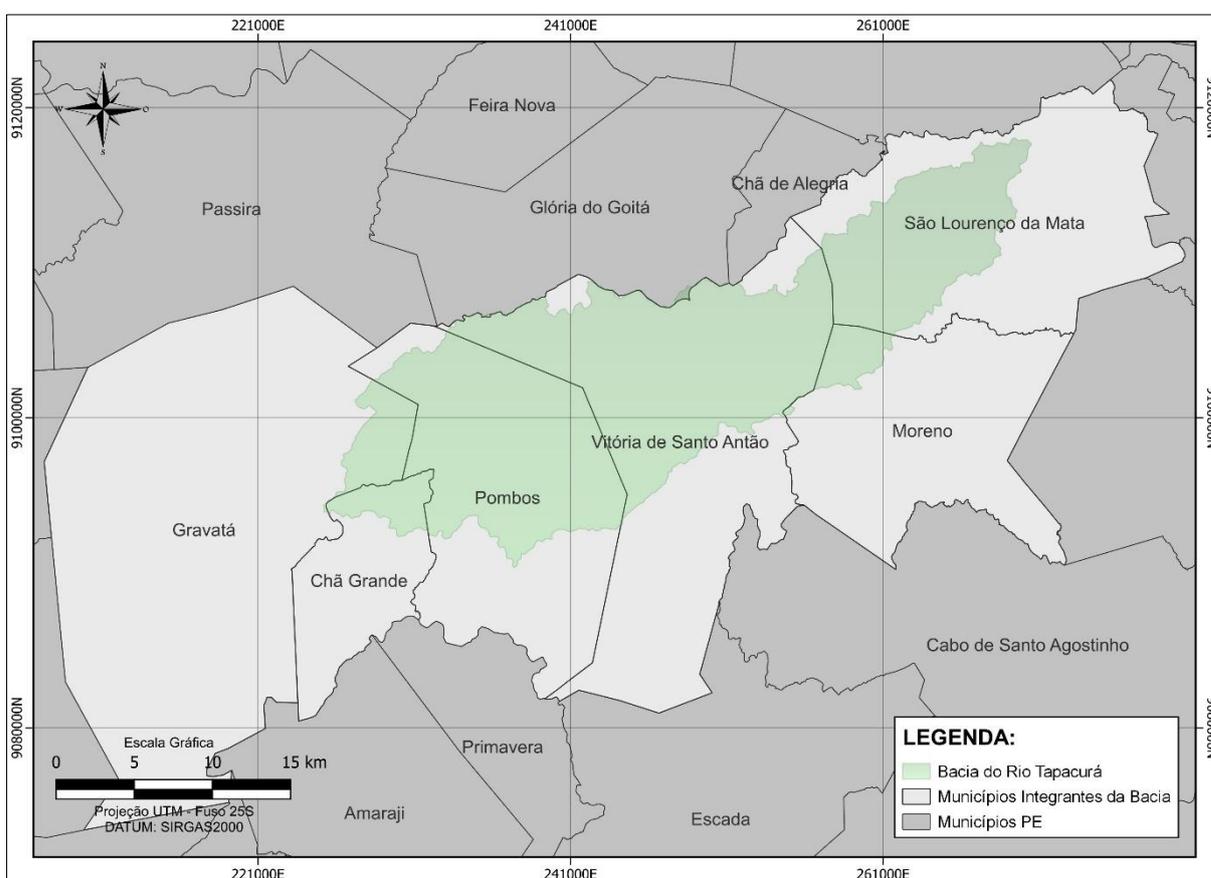
Os solos predominantes na bacia do Rio Tapacurá são os Gleissolos, Neossolos Litólicos, Planossolos, Neossolos Flúvicos, Luvisolos Crômicos, Neossolos Regolíticos, Latossolos e Argissolos, conforme preconiza a nova classificação de solos proposta pela Embrapa (2013). Predomina na região, os solos do grupo hidrológico C, abrangendo 73,76% da área da bacia (XAVIER *et al.*, 2018).

Conforme exposto por Sartori *et al.* (2005), o grupo C compreende os solos que contém baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, com camadas que

dificultam o movimento vertical da água através das camadas superiores em direção as camadas inferiores, ou com textura moderadamente final e baixa taxa de infiltração, com taxa mínima de infiltração de 1,27 - 3,81 mm/h.

A bacia do Rio Tapacurá abrange os municípios de Chã Grande, Gravatá, Moreno, Pombos, São Lourenço da Mata e Vitória de Santo Antão. A nascente do curso principal está localizada no município de Gravatá, na Zona da Mata Sul de Pernambuco, na região conhecida como Serra das Russas, já a desembocadura no Rio Capibaribe acontece no município de São Lourenço da Mata, pertencente a Região Metropolitana do Recife (Figura 17). Os municípios de Vitória de Santo Antão e Pombos são os mais importantes da bacia, visto que ocupam a maior parte de sua área, 38,6% e 31,2%, respectivamente (XAVIER *et al.*, 2018).

Figura 17 – Bacia do Rio Tapacurá em relação aos municípios pernambucanos.



Fonte: O Autor (2023).

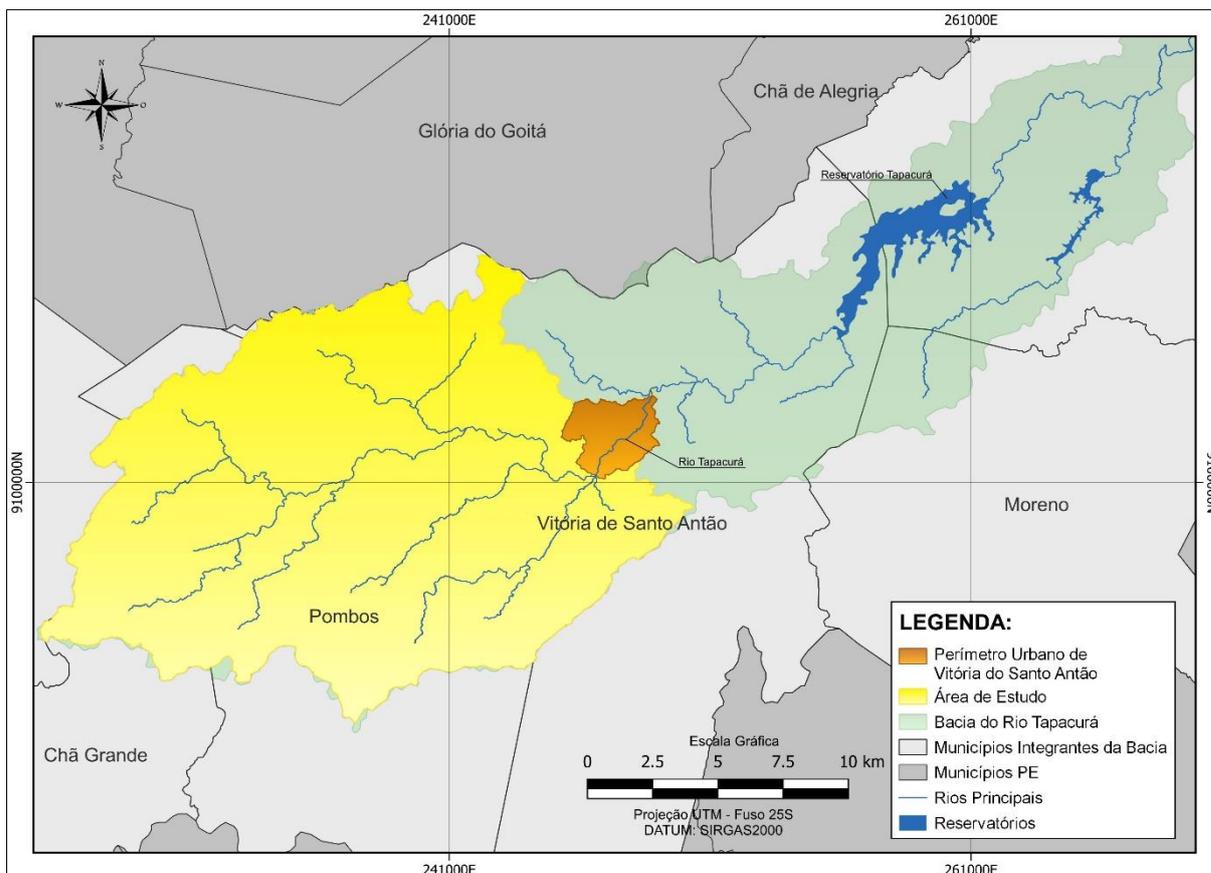
A bacia possui relevo constituído majoritariamente por colinas e cristas, sendo a primeira predominante na porção mais ao leste da bacia, próximo à confluência do Rio Tapacurá com o Rio Capibaribe e chega até o leste do município de Pombos. Na

porção oeste da bacia, a partir do distanciamento da calha do Rio Tapacurá nos sentidos norte e sul, a altitude dos topos eleva-se de maneira gradual, enquanto as colinas vão cedendo lugar aos relevos mais contínuos e orientados, constituindo as cristas (BRAGA, 2001).

#### 4.1.2 Área urbana de Vitória de Santo Antão

Como o objetivo final desta pesquisa é avaliar o perigo de inundação na zona urbana do município de Vitória de Santo Antão, a área de estudo efetivamente utilizada é um recorte da porção oeste da bacia do Tapacurá até o posto fluviométrico localizado imediatamente à jusante do perímetro urbano da cidade, posto esse que será utilizado para validar o modelo hidrológico. Desse modo a área de estudo deste trabalho pode ser observada em amarelo, na Figura 18.

Figura 18 – Perímetro urbano de Vitória de Santo Antão.



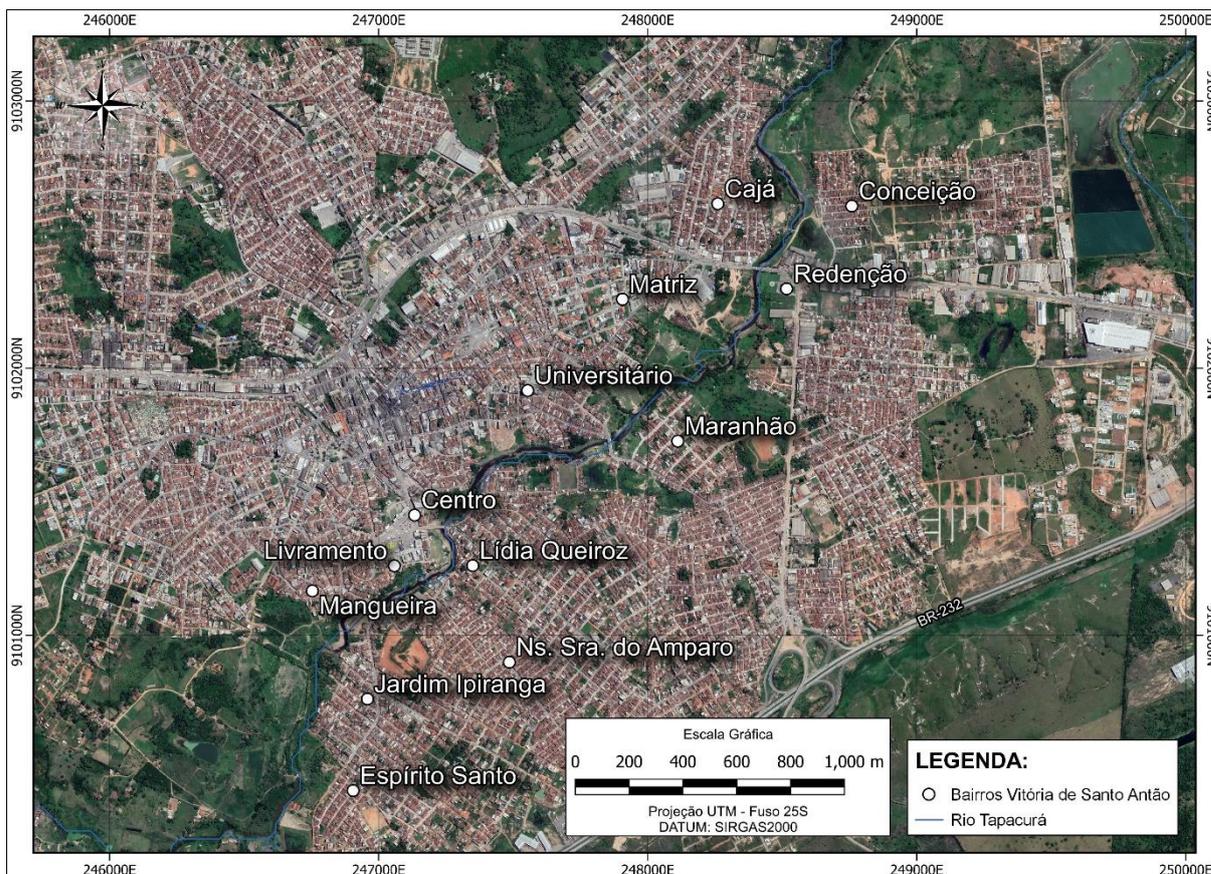
Fonte: O Autor (2023).

O perímetro urbano do município de Vitória de Santo Antão está localizado às margens da BR-232, a 51 km da capital do estado, Recife, possuindo uma área de aproximadamente 23 km<sup>2</sup>, nas coordenadas geográficas 8°6'36" Latitude Sul e 35°17'24" Longitude Oeste.

O perímetro urbano é composto por zoneamento misto (residência, comércio e indústria) de média densidade, ainda com poucos sinais de verticalização. A maior parte das vias urbanas são pavimentadas, de modo que a maior parte do solo está impermeabilizado. O Rio Tapacurá divide a cidade bem no meio, considerando o sentido do fluxo, o rio tem em sua margem esquerda os bairros da Mangueira, Universitário, Matriz, Cajá, Água Branca e Santana, bairros que concentram a maior parte do comércio da cidade. Já na margem direita do rio estão os bairros de Espírito Santo, Jardim Ipiranga, Maranhão, Nossa Senhora do Amparo, Lídia Queiroz, Redenção e Conceição, sendo esse por sua vez majoritariamente residencial, apesar de possuir diversos estabelecimentos comerciais de pequeno porte (Figura 19). Segundo o censo de 2010 apresentado no IBGE Cidades (IBGE, 2023), o município possui uma população de 129.974 habitantes, sendo 113.429 (87,2%) desses situados na zona urbana.

A ocupação desordenada ao longo da margem do rio, impermeabilização das planícies próximas a calha do rio, além de problemas corriqueiros em situações de rios urbanos, como assoreamento e lançamento de esgoto, são fatores que potencializam os perigos ocasionados pelas inundações às pessoas, imóveis e infraestrutura. Por esses motivos, a modelagem hidrodinâmica para obtenção dos mapas de perigo de inundação será proposta para o recorte observado na Figura 19.

Figura 19 – Bairros de Vitória de Santo Antão.



Fonte: O Autor (2023).

## 4.2 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

O presente trabalho foi desenvolvido conforme o fluxograma exibido na Figura 20 de modo a facilitar a compreensão das etapas necessárias para a obtenção do objetivo final.

As etapas de trabalho foram divididas em: estudo da literatura, coleta de dados, pré-processamento dos dados de entrada dos modelos, modelagem hidrológica (aqui cabendo o destaque para a etapa de calibração e validação, cujo atendimento é fundamental para o sucesso do modelo), modelagem hidrodinâmica 2D e, por fim, elaboração dos mapas de indicadores e índices de perigo de inundação. Cada uma das etapas citadas é descrita em detalhes nos itens que se sucedem.

Figura 20 – Fluxograma de atividades da dissertação.



Fonte: O Autor (2023).

### 4.3 AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Nesta seção são apresentados os dados e informações utilizados para a construção dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos e para a realização das simulações.

### 4.3.1 Dados geográficos e topográficos

Neste item será detalhado as fontes de dados geográficos e topográficos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

#### 4.3.1.1 Fonte de dados vetoriais

Nas diversas etapas dos processos em SIG realizados nesta pesquisa, como na elaboração de cartas georreferenciadas temáticas que ilustram o presente trabalho, pré-processamento dos dados matriciais que servem como dado de entrada para os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, além da elaboração dos mapas de perigo de inundação que serão apresentados no Capítulo 5 desse volume, foi necessário a utilização de camadas vetoriais georreferenciadas.

As camadas vetoriais que serviram como dado de entrada para esta pesquisa foram obtidas dos produtos de geociências do IBGE, tais quais os limites geográficos da Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, pertencente ao banco de dados de Bacias Nível 6 do produto intitulado Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil (IBGE, 2021).

Todos os mapas elaborados no presente trabalho foram produzidos utilizando o DATUM SIRGAS2000 25S.

#### 4.3.1.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)

Para realização da simulação hidrológica e hidrodinâmica é necessário que haja informações a respeito da geomorfologia da área de estudo. Através de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) é possível obter acesso a tais informações.

De acordo com Weibel e Heller (1991), o Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma representação matemática da superfície terrestre, ou seja, corresponde à representação em meio digital de uma superfície real. O MDT pode ser utilizado para diversos fins, tais como a visualização, análise e modelagem de terrenos em três dimensões.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o MDT utilizado foi o produzido pelo programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que possui superfícies geradas a partir de perfilamento a laser com voo tripulado na escala de 1:5000, com resolução

espacial de 1 m, capturado em 2014. Os dados podem ser obtidos seguindo as instruções no seguinte sítio eletrônico do PE3D (PERNAMBUCO, 2023).

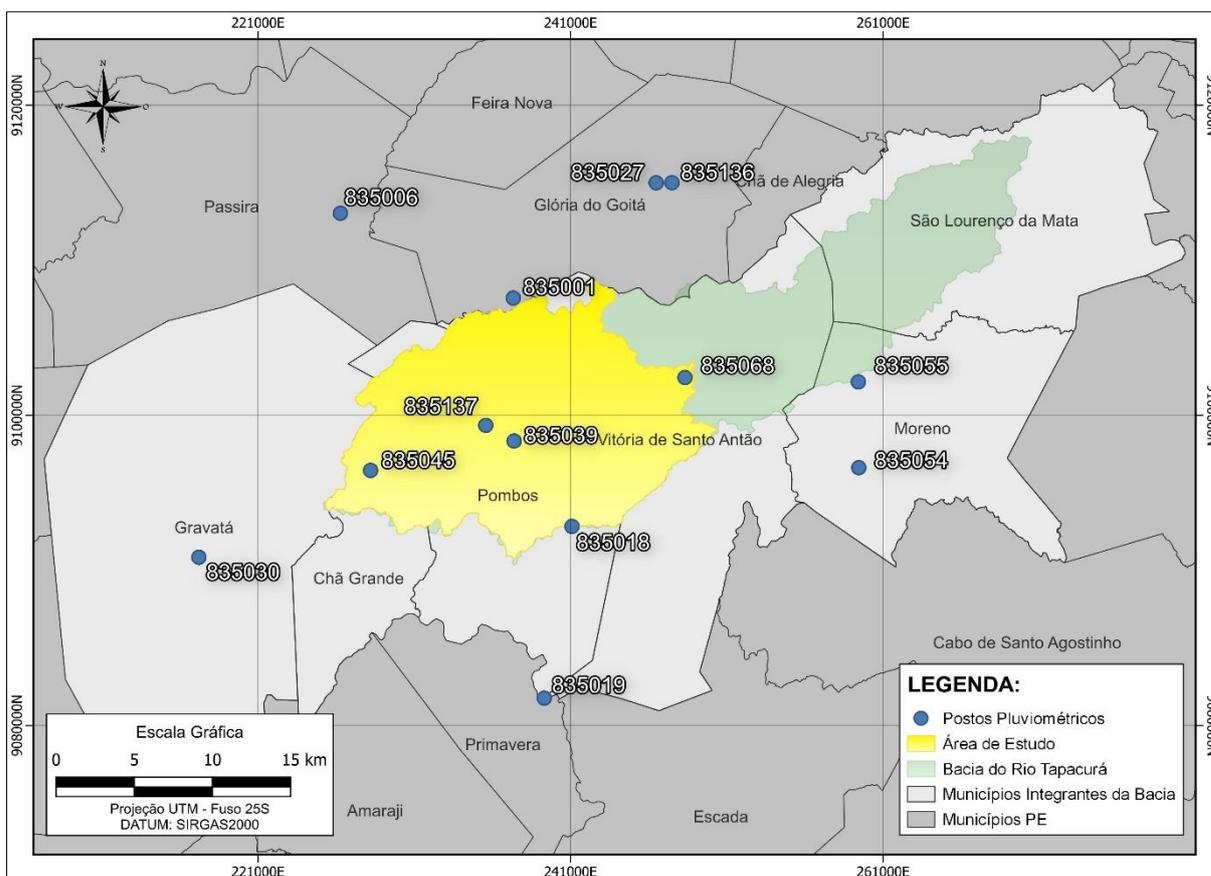
### 4.3.2 Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da base de dados do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023).

#### 4.3.2.1 Dados pluviométricos

Os dados de precipitação foram obtidos a partir de 13 estações pluviométricas, distribuídas no entorno da área de estudo, conforme pode ser observado na Figura 21.

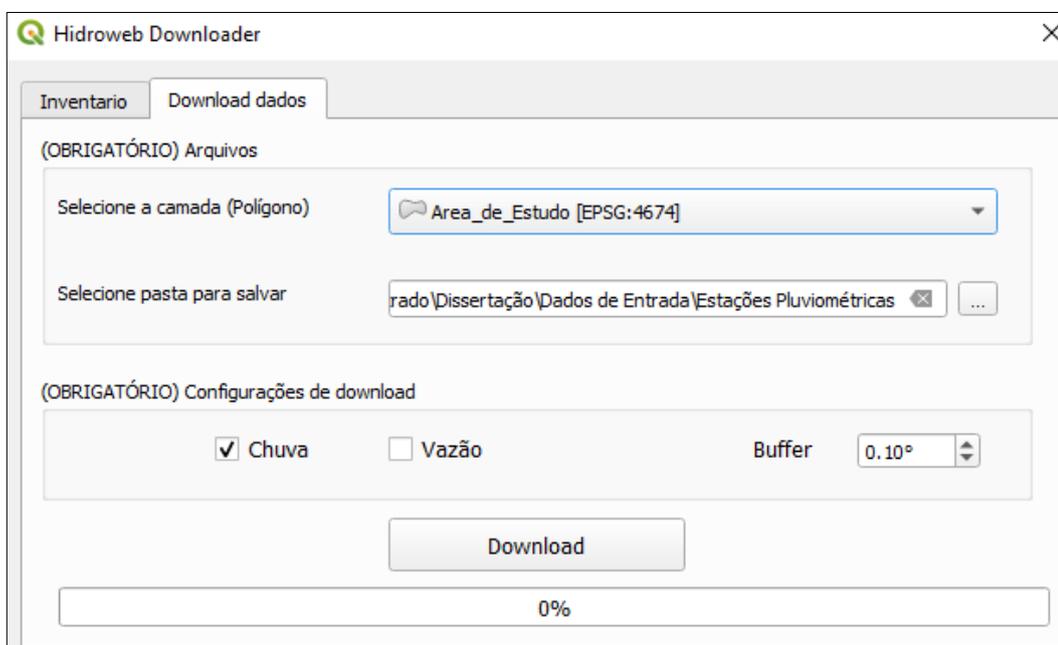
Figura 21 – Estações pluviométricas na bacia do Tapacurá e em seu entorno.



Fonte: O Autor (2023).

Os dados foram obtidos através do complemento Hidroweb Downloader 1.1.0 instalado no programa de livre acesso QGIS 3.28.5 – Firenze. O requisito para a utilização do complemento é a utilização de um inventário de estações Hidroweb (disponibilizado pelo próprio complemento), em seguida, foi selecionado a camada vetorial contendo a área de estudo e apontado a pasta para download dos arquivos contendo as informações das estações pluviométricas. Um *buffer* de 0,10° foi colocado para se obter estações que por ventura se localizem um pouco fora da área de estudo, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Complemento Hidroweb Downloader.



Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 11 apresenta os dados dos 13 postos pluviométricos escolhidos. Desse modo, foram obtidas informações diárias a respeito da precipitação registrada em cada um desses postos. Foram utilizados os dados de precipitação a partir de 01/01/1984 até 31/08/2022 para o cálculo da precipitação média, calculado conforme metodologia detalhada no item 4.3.2.2, a seguir.

Tabela 11 – Dados dos postos pluviométricos selecionados.

Município	Cód. da Estação	Nome da Estação	Lat.	Long.	Órgão Responsável
Glória do Goitá	835001	Apoti (Duarte Dias)	-8,067	-35,383	SUDENE
Passira	835006	Bengalas	-8,017	-35,483	SUDENE
Pombos	835018	Engenho Serra Grande	-8,200	-35,350	SUDENE
Primavera	835019	Engenho Tabocas	-8,300	-35,367	SUDENE
Glória do Goitá	835027	Glória do Goitá	-8,000	-35,300	SUDENE
Gravatá	835030	Gravatá	-8,217	-35,567	DNOCS
Pombos	835039	São José dos Pombos	-8,150	-35,383	SUDENE
Gravatá	835045	Russinha	-8,167	-35,467	SUDENE
Moreno	835054	Tapacurá	-8,167	-35,183	INMET
Moreno	835055	Tapera	-8,117	-35,183	SUDENE
Vitória de Santo Antão	835068	Vitória de Santo Antão	-8,114	-35,284	SGB/CPRM
Glória do Goitá	835136	Glória do Goitá	-8,000	-35,291	SGB/CPRM
Pombos	835137	Pombos	-8,141	-35,400	SGB/CPRM

Fonte: O Autor (2023).

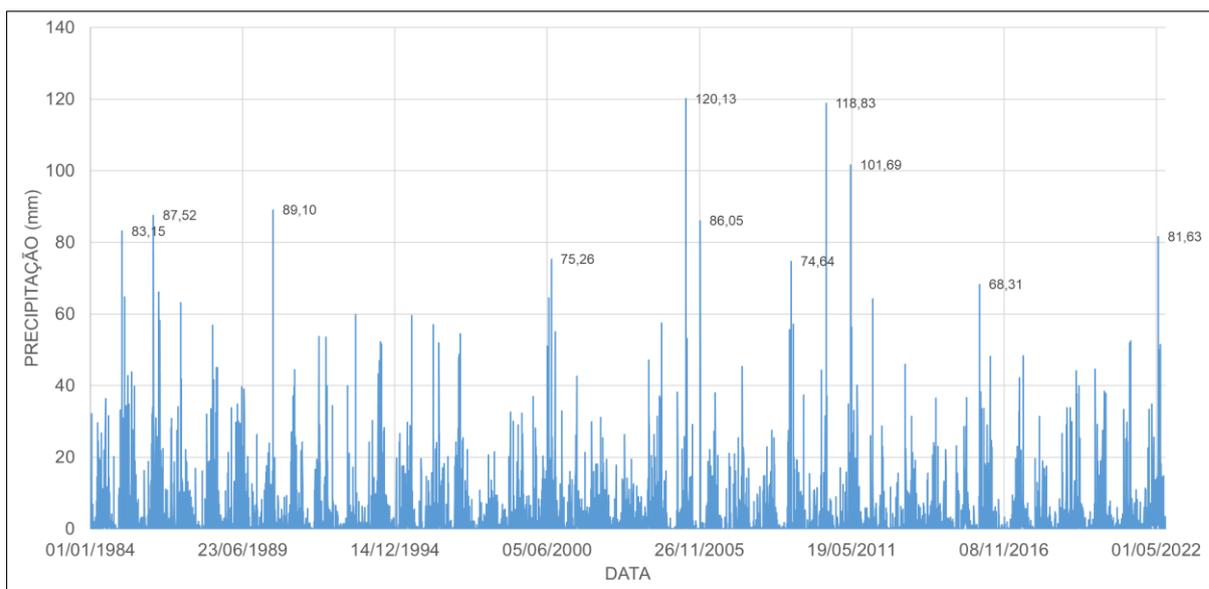
#### 4.3.2.2 Cálculo da precipitação média

Para o cálculo da precipitação média foi utilizado o interpolador IDW (*Inverse Distance Weight*). Segundo Silva *et al.* (2013), o método IDW pondera o peso de um dado valor com base em sua proximidade com o ponto no qual a variável está sendo calculada. Nesse método o peso de cada valor é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior é o peso a ser atribuído ao valor amostrado.

A aplicação do interpolador IDW para se descobrir a precipitação média diária, levando em conta os 13 postos escolhidos, foi feita em relação ao centroide da área de estudo apontada em amarelo na Figura 21. Os cálculos foram feitos com ajuda de

planilha MS Excel para o intervalo de tempo de 01/01/1984 até 31/08/2022, a Figura 23 apresenta o gráfico da precipitação média calculada para cada dia do período citado, onde é possível observar as datas em que ocorrem picos de precipitação diária, conhecidos como eventos extremos, que serão frutos de análise nas seções seguintes deste estudo.

Figura 23 – Série histórica de precipitação média calculada para cada dia.



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.3.2.3 Dados fluviométricos

O posto fluviométrico selecionado para este trabalho pode ser identificado na Tabela 12. Esse posto escolhido foi utilizado para calibração e validação do modelo hidrológico. Esse posto dispõe de dados de vazão diária no período entre 01/06/1984 até 31/12/2021.

Tabela 12 – Posto fluviométrico utilizado na modelagem hidrológica.

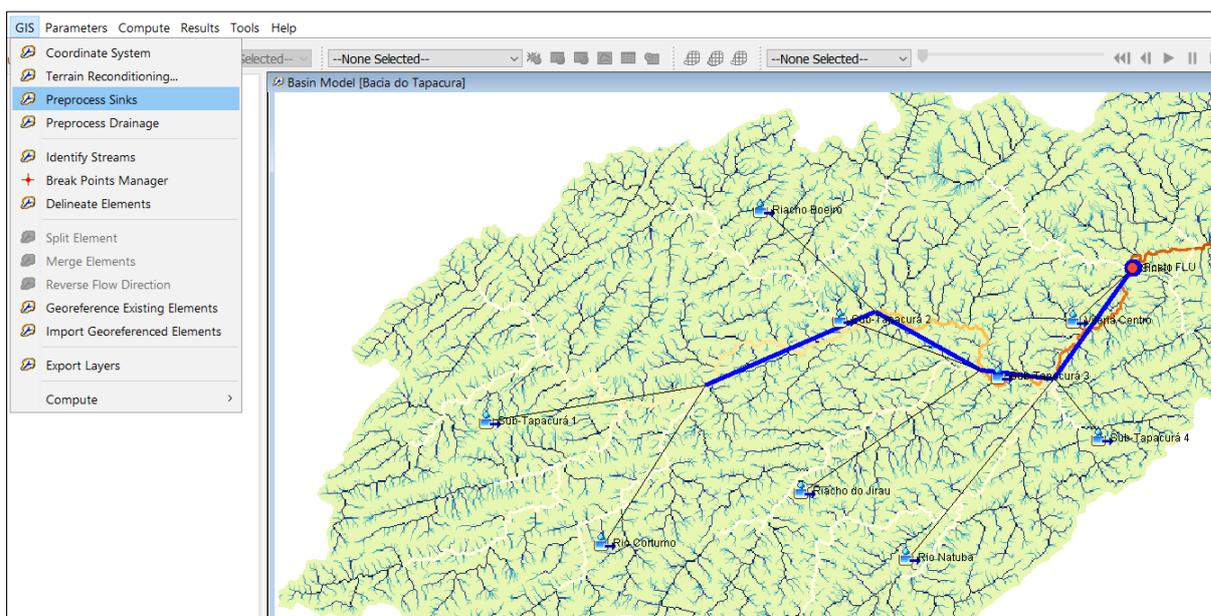
Posto fluviométrico	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Código	Lat.	Long.	Órgão responsável
Vitória de Santo Antão	264,00	39170000	-8,114	-35,283	ANA

Fonte: O Autor (2023).

### 4.3.3 Pré-processamento e definição da rede de drenagem

O rio Tapacurá ao longo de sua extensão, até chegar na seção de controle (local onde o posto fluviométrico para calibração e validação do modelo se encontra), apresenta afluentes em forma de rios e riachos, como o rio Natuba e Jirau e o riacho Coturmo, por exemplo. Desse modo, é necessário a definição da rede de drenagem e de suas bacias contribuintes. O processo de discretização da bacia do rio Tapacurá em sub-bacias foi realizado através das ferramentas presentes no menu GIS (Figura 24) do programa HEC-HMS (Versão 4.10), tendo como dado de entrada o MDT do PE3D. O procedimento foi realizado conforme descrito no Manual do Usuário (USACE, 2022).

Figura 24 – Menu “GIS” do HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2023).

O primeiro passo é a determinação do sistema de coordenadas, nesse trabalho foi utilizado o DATUM SIRGAS2000 25S (EPSG: 31985). Em seguida, é feito o preenchimento de depressões do MDT com a ferramenta “*Preprocess Sinks*”. O próximo passo é o pré-processamento da rede de drenagem (determinação da direção do fluxo e acumulação do fluxo para cada célula da malha do MDT) com a ferramenta “*Preprocess Drainage*”. Por sua vez, a rede de drenagem é definida a partir da ferramenta “*Identify Streams*”, para tal, é necessário apontar um limite para a área de

acumulação de drenagem, no caso deste trabalho, foi escolhido uma área limite de 5 km<sup>2</sup>.

Após o pré-processamento da rede de drenagem, é necessário a colocação de um “*Break Point*” interceptando a rede de drenagem no local onde se deseja colocar o exutório do modelo hidrológico, nesse caso, o exutório será colocado no ponto onde existe o posto fluviométrico, de modo que a vazão simulada pelo modelo possa ser comparada (para fins de calibração e validação) com os dados de vazão observados pelo posto fluviométrico. Com o “*Break Point*” posicionado, é finalmente possível a determinação das sub-bacias da área de estudo com o comando “*Delineate Elements*”, do menu GIS do HEC-HMS.

Após a determinação das sub-bacias, efetivou-se um processo de junção de feições para que o modelo hidrológico não fique com tantas pequenas sub-bacias desnecessariamente.

Parte importante do processo de discretização da área de estudo em sub-bacias é a obtenção de suas respectivas características morfométricas, tais como declividade média das bacias, comprimento e declividade do curso d'água principal, área etc. Essas informações são utilizadas para estimar parâmetros de entrada do modelo hidrológico, sendo o principal deles o tempo de concentração.

O trabalho de Silveira (2005) avalia o desempenho de fórmulas do tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. O autor recomenda que para bacias urbanas a fórmula para o tempo de concentração que apresenta o melhor desempenho é a equação de Carter (Equação (32)):

$$t_c = 0,0977 \times L^{0,6} \times S^{-0,3} \quad (32)$$

Onde  $t_c$  é o tempo de concentração em horas,  $L$  é o comprimento da drenagem principal em km e  $S$  é a declividade do curso d'água principal em m/m.

Já para as bacias rurais, Silveira (2005) conclui que a fórmula para o tempo de concentração com melhor desempenho é a proposta pelo *Corps of Engineers*, dada pela Equação (33):

$$t_c = 0,191 \times L^{0,76} \times S^{-0,19} \quad (33)$$

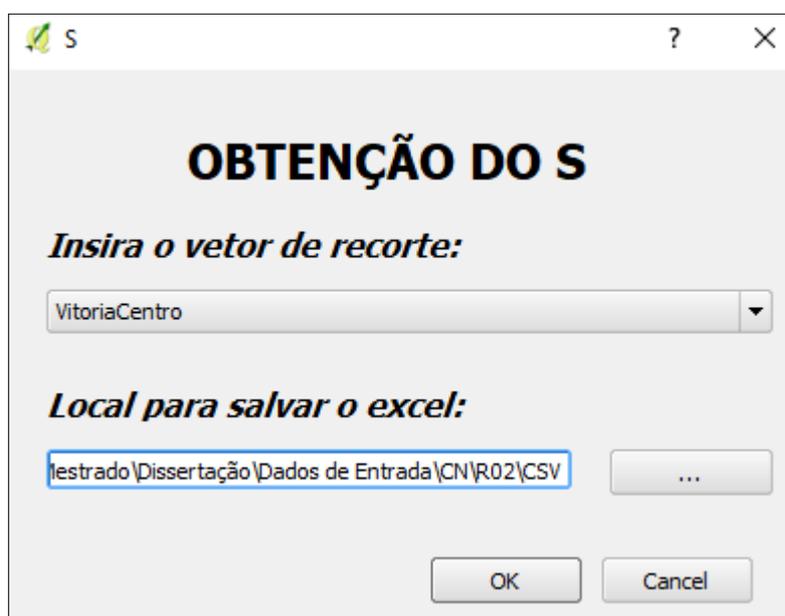
Para a sub-bacia de Vitória-Centro foi utilizada a equação de Carter, visto ser a única sub-bacia urbana da área de estudo, para as demais, majoritariamente ou completamente rurais, foi utilizada a equação proposta *pele Corps of Engineers*.

#### 4.3.4 *Curve Number (CN)* e capacidade de infiltração do solo (*S*)

Para o cálculo da parcela da precipitação que infiltra no solo e não contribui para o escoamento superficial, o método de perda (*Loss method*) utilizado no presente estudo foi o desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS, 1979) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*). Um dado de entrada desse método é o valor da Curva Número (*Curve Number – CN*).

Através do complemento “CalcularS” disponível para o QGIS (Versão 2.18.9) foi obtido o valor do CN. Como dado de entrada, o complemento exige o arquivo vetorial de área e deve ser apontado uma pasta para armazenar os arquivos CSV com o resultado do CN médio e o valor do *S* para cada sub-bacia.

Figura 25 – Complemento “CalcularS” do QGIS 2.18.9.



Fonte: O Autor (2023).

Esse complemento produz arquivos do tipo *shapefile* que possui diversas regiões, cada uma delas contendo em suas Tabelas de Atributos a classe hidrológica do solo conforme a classificação SCS e a classificação quanto ao uso e ocupação do

solo, já com o conseqüente valor do CN, do S e da área. Dessa maneira, é possível calcular o CN médio para cada sub-bacia através da média ponderada pela área do CN de todas as regiões contidas em cada sub-bacia. O QGIS permite a extração dos dados da Tabela de Atributos em MS Excel, onde os cálculos do CN médio de cada sub-bacia.

#### 4.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

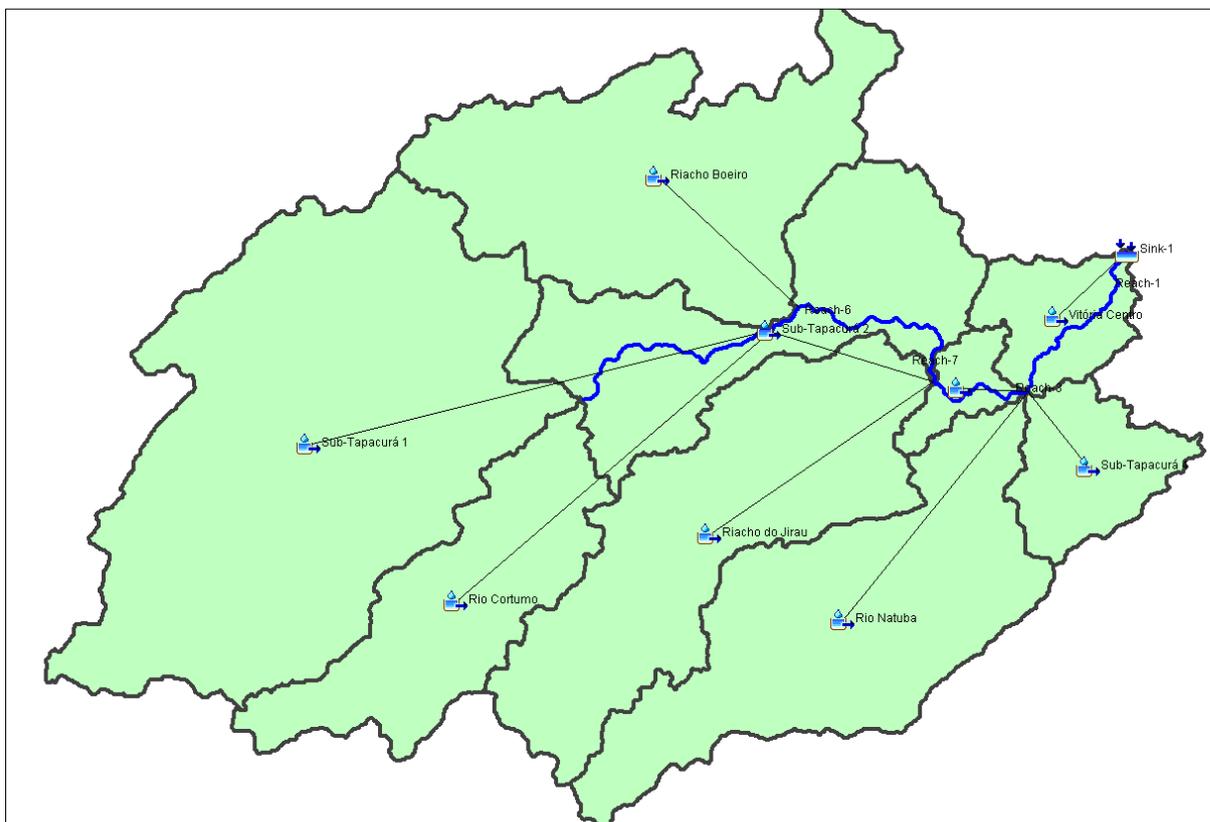
A modelagem hidrológica foi realizada a partir do programa de livre acesso HEC-HMS 4.10 desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE, 2022a). Uma das principais vantagens do uso do HEC-HMS é a sua ampla utilização em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos na avaliação de manchas de inundação (MOREIRA, 2013, RIBEIRO NETO *et al.*, 2016, MORAES *et al.*, 2018, FONSECA NETO *et al.*, 2020, AL-HUSSEIN *et al.*, 2022).

Para o método de perdas (*Loss method*) utilizado foi o *SCS Curve Number*, o valor do CN inicial foi definido conforme explicado no item 4.3.4. O método de transformação chuva-vazão (*Transform method*) utilizado foi o *SCS Unit Hydrograph*, onde o tempo de concentração foi calculado conforme abordado no item 4.3.3, e por fim, para o método de propagação de vazões foi escolhido o Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969). O modelo meteorológico foi configurado como “Specified Hyetograph”, onde todas as sub-bacias receberam a série história de precipitação média entre as datas de 01/01/1984 até 31/08/2022 obtida através da aplicação do interpolador IDW (conforme item 4.3.2.2). O ponto de exutório foi associado a série história dos dados de vazão do posto fluviométrico ANA-39170000 para possibilitar a calibração e validação do modelo através da comparação dos dados simulados com os observados. A bacia do modelo foi configurada em 8 sub-bacias, 5 rios (*reaches*) e 1 exutório, conforme exibido na Figura 26.

A etapa de calibração foi feita de maneira manual para permitir uma maior sensibilidade no efeito que cada parâmetro possui no modelo hidrológico. A calibração se deu, principalmente, pela alteração manual do parâmetro CN e posterior realização de uma nova rodada de simulação até que os parâmetros NSE, Pbias e RSR se encontrem dentro de um intervalo aceitável. A validação foi feita conforme a metodologia proposta por Moriasi *et al.* (2007), que classifica o modelo hidrológico

como Muito Bom, Bom, Satisfatório ou Insuficiente com base numa faixa de valores que pode ser observada na Tabela 5.

Figura 26 – Modelo de bacia configurado no HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada no programa computacional de livre acesso HEC-RAS 6.3.1 (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2022b). De maneira semelhante ao HEC-HMS, o HEC-RAS foi escolhido por ser amplamente utilizado em estudos hidrodinâmicos e com resultados eficientes da modelagem. (ONGDAS *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2022).

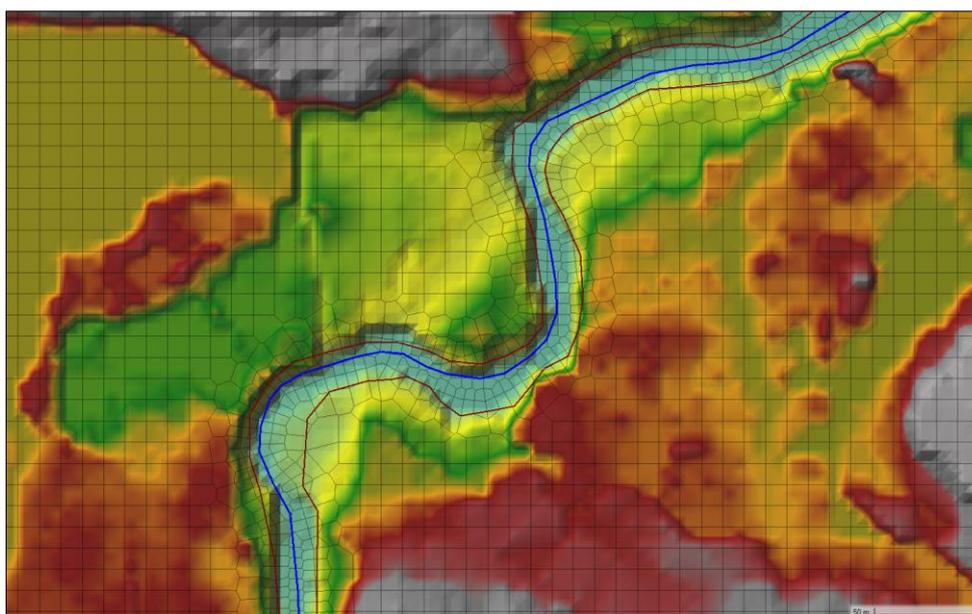
Para a modelagem hidrodinâmica 2D, o HEC-RAS utiliza as equações da Onda Difusa de Águas Rasas. As condições de contorno selecionadas para o modelo foram o *Flow Hydrograph* (vazão de entrada na extremidade de montante), *Uniform Lateral Inflow* (contribuição lateral da bacia ao longo de várias seções) e *Normal Depth* (inclinação da linha de energia na extremidade de jusante). As duas primeiras

condições de contorno utilizam os hidrogramas de vazão na entrada da sub-bacia Vitória-Centro e o hidrograma de vazão produzido pela própria bacia (Tabela 20), respectivamente, e a terceira condição de contorno considerou-se a inclinação média do fundo do canal, que é de 0,003.

Para representar o terreno da área de estudo, foi utilizado o MDT obtido através de perfilamento a laser na escala 1:5000 disponibilizado pelo projeto PE3D (PERNAMBUCO, 2023). A malha principal foi definida com espaçamentos  $DX = 10$  m e  $DY = 10$  m, além disso foi definido uma malha refinada ao longo da calha do rio com espaçamento de  $DX = 5$  m e  $DY = 5$  m, totalizando 25.616 células. Esse número foi escolhido através de testes que avaliaram a qualidade dos resultados em relação ao custo computacional envolvido, de maneira semelhante ao relatado no trabalho de Yalcin (2020), não houve ganhos significativos na qualidade dos resultados para uma malha computacional mais refinada, mas em compensação o custo computacional (tempo de simulação) tornou-se bastante elevado.

Além da redução das dimensões das células, a malha computacional foi refinada através do uso de *breaklines* (linhas de quebra), com o intuito de melhor orientar o escoamento simulado. Vale ressaltar que para o presente estudo, não foram consideradas as pontes existentes ao longo do rio. A Figura 27 exemplifica o detalhe da malha bidimensional gerada para o modelo.

Figura 27 – Detalhe da malha de células utilizada na simulação hidrodinâmica.



Fonte: O Autor (2023).

O intervalo de simulação adotado foi de 20 segundos, já os intervalos dos resultados gerados foram definidos para 1 hora. O tempo total de simulação foi de 15 minutos e 19 segundos.

#### 4.6 EVENTOS SIMULADOS

Para a modelagem hidrológica foram escolhidos 6 eventos extremos, 1 deles foi escolhido como evento de calibração do modelo hidrológico, e os outros 5 foram escolhidos para validar o modelo, conforme mostra na Tabela 13.

Tabela 13 – Eventos simulados na modelagem hidrológica.

<b>Evento</b>	<b>Data inicial</b>	<b>Data final</b>	<b>Tipo</b>
08/2000	28/07/2000	08/08/2000	Validação
06/2005	27/05/2005	13/06/2005	Validação
06/2010	14/06/2010	07/07/2010	Validação
05/2011	28/04/2011	12/05/2011	Calibração
07/2017	15/07/2017	31/07/2017	Validação
05/2021	09/05/2021	26/05/2021	Validação

Fonte: O Autor (2023).

Para avaliar a mancha de inundação e permitir a elaboração dos mapas de perigo de inundação, na modelagem hidrodinâmica foi escolhido o evento extremo de maio de 2011, por se tratar do evento com maior pico de vazão observada.

Para reduzir o tempo necessário para se realizar a simulação, a modelagem hidrodinâmica teve início às 0h do dia 29 de abril de 2011 e terminou às 24h do dia 07 de maio de 2011, tempo suficiente para observar a evolução do evento extremo.

#### 4.7 MAPAS DE PERIGO

Para a elaboração dos Mapas de Perigo, seis indicadores foram utilizados: profundidade da água, velocidade do escoamento, energia da água, força do escoamento, intensidade e uma combinação entre a profundidade e a velocidade.

Os produtos de profundidade e velocidade de escoamento foram produzidos diretamente pelo HEC-RAS, já os indicadores de energia da água, força do

escoamento e intensidade foram obtidos através das Equações (29), (30) e (31), sendo essas aplicadas com a ferramenta “Calculadora Raster” do QGIS.

Cada um dos indicadores receberam a classificação de perigo Baixo, Médio ou Alto conforme as faixas limite apresentados na Tabela 10.

Para o indicador de perigo que avalia a média aritmética entre a profundidade e a velocidade proposto por Ribeiro Neto *et al.* (2016), os produtos *raster* de profundidade e velocidade obtidos no HEC-RAS foram normalizados de modo que os *pixels* categorizados como perigo baixo receberam o valor de 1, os categorizados como perigo médio receberam o valor de 2 e os de perigo alto receberam o valor de 3. Em seguida, com o auxílio da “Calculadora Raster” do QGIS 3.28.5, foi feito a operação de média aritmética entre a profundidade e a velocidade. O resultado dessa operação foi arredondado para cima (em caso de a divisão fornecer um resultado fracionado) e, finalmente, foi feita a reclassificação do resultado, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Combinação da profundidade da água e velocidade de escoamento.

Profundidade	Velocidade	Combinação	Perigo
1	1	1	Baixo
2	1	2	Médio
3	1	2	Médio
1	2	2	Médio
2	2	2	Médio
3	2	3	Alto
1	3	2	Médio
2	3	3	Alto
3	3	3	Alto

Fonte: Adaptado de Ribeiro Neto *et al.* (2016).

Os mapas de perigo serão elaborados a partir do evento extremo de maio de 2011, para os produtos de profundidade da água e da velocidade do escoamento máximas, obtidas da simulação hidrodinâmica com o HEC-RAS.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica a partir da aplicação das metodologias.

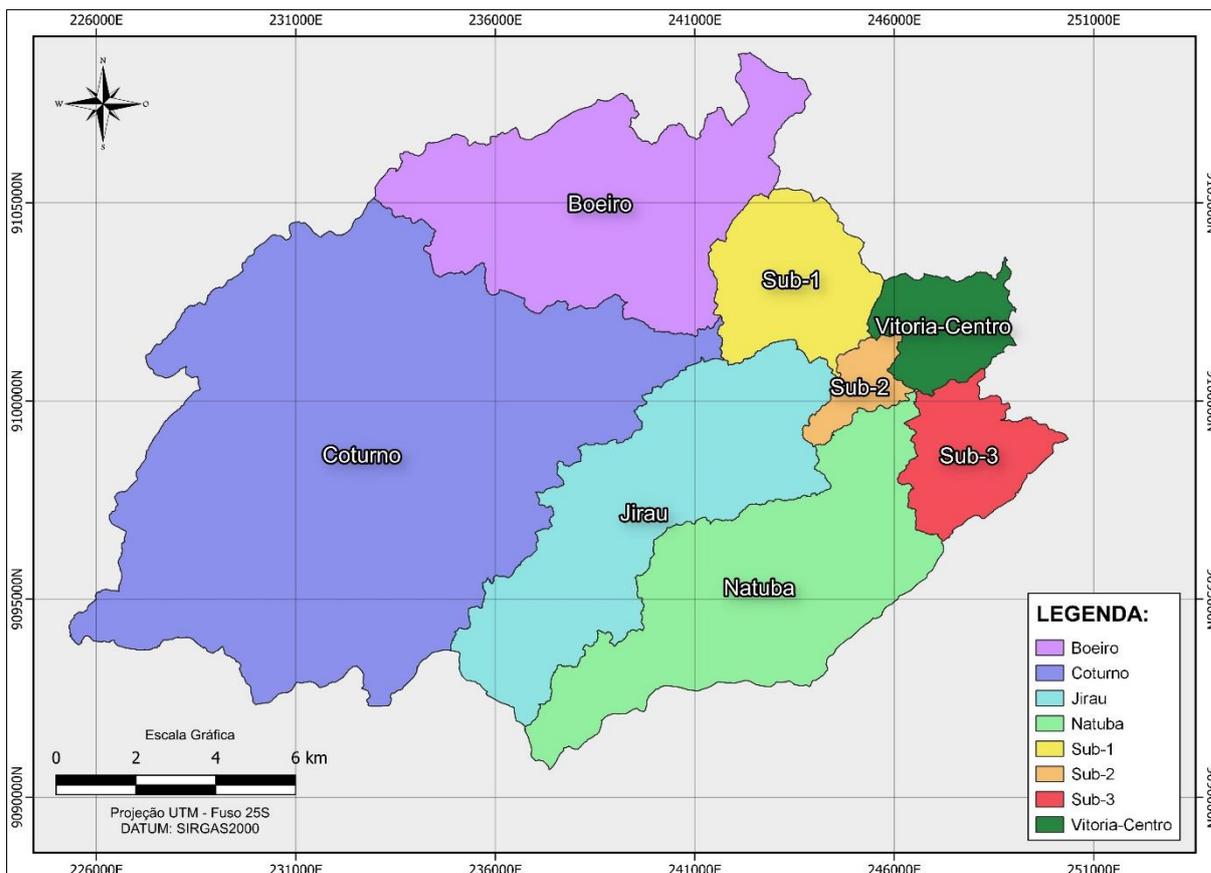
### 5.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesse item serão apresentados os resultados da etapa de pré-processamento.

#### 5.1.1 Discretização da área de estudo

Na Figura 28, observa-se o resultado da discretização da bacia do Tapacurá em sub-bacias desenvolvido no HEC-HMS.

Figura 28 – Sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Tapacurá.



Fonte: O Autor (2023).

Como é possível observar na Figura 28, a área de estudo foi dividida em 9 sub-bacias, são elas: Boeiro, Coturmo, Jirau, Natuba, Sub-Tapacurá 1, Sub-Tapacurá 2, Sub-Tapacurá 3, Sub-Tapacurá 4 e Vitória Centro.

Após a definição das sub-bacias da área de estudo, foram obtidas as características morfométricas de cada uma delas, que serviu como dado de entrada do modelo hidrológico. Na Tabela 15, têm-se as principais características das sub-bacias definidas para a área de estudo do presente trabalho.

Tabela 15 – Características fisiográficas das sub-bacias da área de estudo.

<b>Sub-Bacia</b>	<b>Área total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Comprimento do curso d'água principal (km)</b>	<b>Declividade do curso d'água principal (s) (m/m)</b>	<b>Tempo de concentração (h)</b>
Riacho Boeiro	38,93	14,61	0,01041	3,49
Riacho do Jirau	36,39	17,23	0,02434	3,37
Rio Cortumo	23,04	14,91	0,02712	2,95
Rio Natuba	37,50	19,29	0,02139	3,76
Sub-Tapacurá 1	73,90	6,28	0,04184	1,41
Sub-Tapacurá 2	28,56	18,76	0,02103	3,69
Sub-Tapacurá 3	3,52	14,37	0,01477	3,23
Sub-Tapacurá 4	9,79	4,13	0,01660	1,22
Vitória Centro	8,04	5,75	0,01103	1,08

Fonte: O Autor (2023).

### 5.1.2 Parâmetro CN

Com a aplicação da metodologia descrita no item 4.3.4, os valores iniciais estimados de CN para cada sub-bacia da área de estudo podem ser observados na Tabela 16. Esses valores foram utilizados na primeira rodada de simulação hidrológica no HEC-HMS.

Tabela 16 – Valores de CN estimados para as sub-bacias da área de estudo.

<b>Sub-Bacia</b>	<b>CN</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b>CN</b>	<b>Sub-Bacia</b>	<b>CN</b>
Riacho Boeiro	69,06	Rio Natuba	65,77	Sub-Tapacurá 3	68,82
Riacho do Jirau	64,17	Sub-Tapacurá 1	73,48	Sub-Tapacurá 4	60,20
Rio Cortumo	67,33	Sub-Tapacurá 2	70,30	Vitória Centro	84,85

Fonte: O Autor (2023).

## 5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Inicialmente, foram feitas simulações isoladas para todos os eventos previamente escolhidos, conforme a Tabela 13. Após finalizadas, os hidrogramas simulados resultantes foram comparados com os dados observados na estação fluviométrica de Vitória de Santo Antão (Tabela 12), durante os eventos escolhidos.

O evento extremo ocorrido em maio de 2011 foi escolhido como evento de calibração, pois é um evento com pico de vazão bastante elevado e bem definido, além de ser temporalmente intermediário entre os demais escolhidos para a validação.

A calibração efetivou-se de forma manual através do ajuste do parâmetro CN por tentativa e erro, visto que esse parâmetro que se mostrou mais sensível na fase de calibração. Após cada rodada de simulação o comportamento estatístico do modelo era avaliado através do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e, buscando maximizar esse coeficiente, ajustes no CN das sub-bacias foram realizados.

Conforme concluiu Silva *et al.* (2008), o coeficiente de Nash-Sutcliffe é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos, isto porque o valor do NSE é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, ou seja, quão mais próximo de um ajuste perfeito o NSE estiver (próximo de 1) significa que o modelo apresenta bons ajustes para as cheias.

Os coeficientes fornecidos nos resultados das simulações hidrológicas pelo HEC-HMS, Pbias e RMSE, também foram levados em consideração durante a etapa de calibração do modelo.

A Tabela 17 apresenta os parâmetros das sub-bacias adotados após a calibração e validação do modelo hidrológico:

Tabela 17 – Parâmetros das sub-bacias após a calibração e validação.

<b>Sub-Bacia</b>	<b>Área total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>CN</b>	<b>Lag time (min)</b>
Riacho Boeiro	38,93	83	209,39
Riacho do Jirau	36,39	77	201,98
Rio Cortumo	23,04	81	177,30
Rio Natuba	37,50	79	225,59
Sub-Tapacurá 1	73,90	88	84,66
Sub-Tapacurá 2	28,56	84	221,58
Sub-Tapacurá 3	3,52	83	193,50
Sub-Tapacurá 4	9,79	72	73,38
Vitória Centro	8,04	96	64,75

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 18 apresenta os coeficientes de desempenho para cada evento simulado após concluída a fase de calibração e validação:

Tabela 18 – Coeficientes de desempenho para cada evento simulado.

<b>EVENTO</b>	<b>NSE</b>	<b>Pbias (%)</b>	<b>RMSE</b>
Maio/2011 (Calibração)	0,940	0,84	0,2
Agosto/2000	0,704	-22,72	0,5
Junho/2005	0,523	33,96	0,7
Junho/2010	0,791	0,57	0,5
Julho/2017	0,781	-3,13	0,5
Maio/2021	0,567	-17,22	0,7

Fonte: O Autor (2023).

É possível observar na Tabela 18 que o evento escolhido para calibração (maio de 2011) foi representado de forma satisfatória no modelo, sendo o ajuste considerado Muito Bom conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007). Segundo a classificação de Silva *et al.* (2008) o evento de calibração apresentou um ajuste considerado Bom, visto que possui valor de NSE maior que 0,75.

De maneira similar, os eventos de validação de junho de 2010 e julho de 2017 também apresentaram todos os indicadores dentro da margem de classificação “Muito Bom” na classificação de Moriasi *et al.* (2007) e “Bom” segundo a classificação de Silva *et al.* (2008).

Os eventos de validação de agosto de 2000, junho de 2005 e maio de 2021, mesmo não apresentando o desempenho excelente dos demais, ainda se mostraram como uma boa representação em relação a realidade observada, sendo classificados como “Satisfatório”, segundo Moriasi *et al.* (2007). Desse modo, é possível afirmar que o modelo hidrológico possui um bom desempenho na representação da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, a julgar pelos valores dos coeficientes estatísticos apresentados neste item.

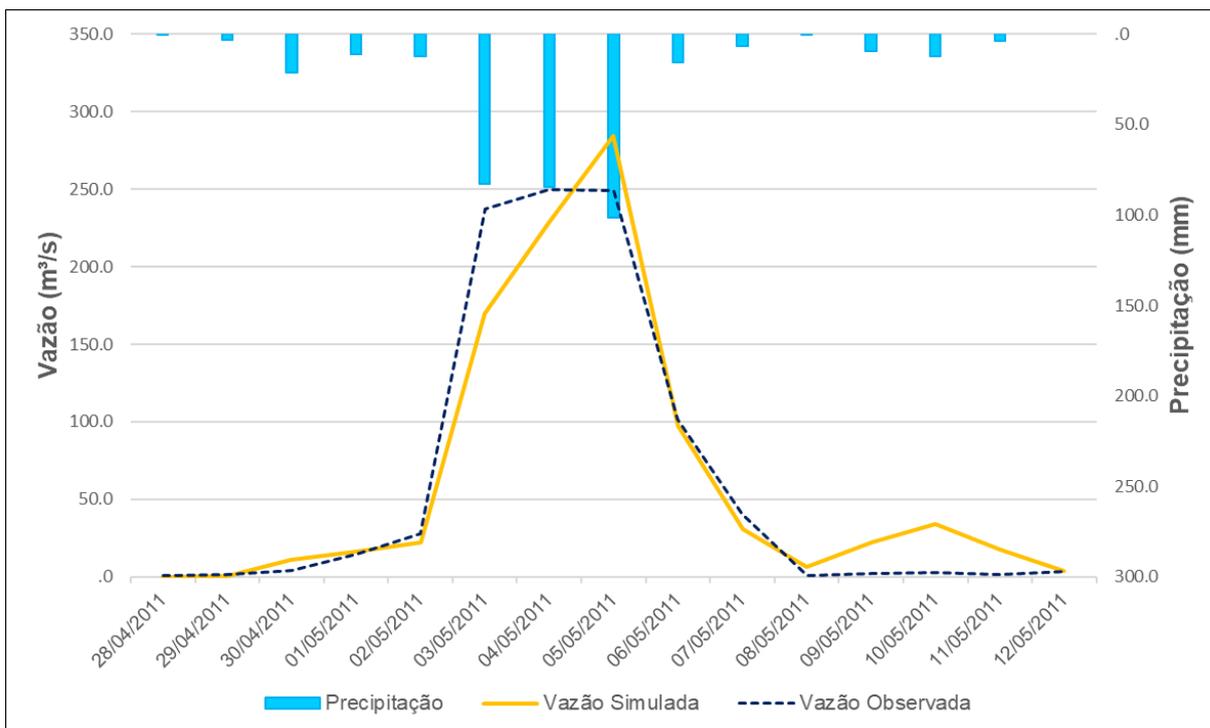
A avaliação de desempenho de modelos hidrológicos proposta por Moriasi *et al.* (2007) é amplamente utilizada, a exemplo do trabalho realizado por Tassew *et al.* (2019) que utilizaram essa classificação para avaliar o desempenho do modelo HEC-HMS para simular a vazão na bacia hidrográfica de Tana Basin, na Etiópia. Os autores concluíram que o modelo foi classificado como “Muito Bom” na comparação dos dados simulados e observados, visto que o NSE médio foi de 0,884.

Joshi *et al.* (2019) simularam a transformação precipitação em escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Cache, no estado de Illinois – EUA, para estimar a vazão de pico em eventos extremos com a finalidade de melhorar as informações disponíveis para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos da bacia. Os autores argumentaram que um modelo está bem calibrado quando o  $NSE \geq 0,65$ , o  $Pbias \leq \pm 10\%$  e o  $RSR \leq 0,60$ , conforme a metodologia de Moriasi *et al.* (2007).

No trabalho realizado por Nobre *et al.* (2021), os autores fizeram uma análise comparativa do desempenho de diferentes modelos hidrológicos aplicados em cinco bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro e, para tal, utilizaram a classificação de Moriasi *et al.* (2007) para comparar o desempenho dos modelos. Os autores encontraram que o HEC-HMS desempenhou melhor em uma bacia, porém obteve rendimento pior que os modelos CAWM (*Campus Agreste Watershed Model*) e GR4J (*Génie Rural à 4 Paramètres Journalier*).

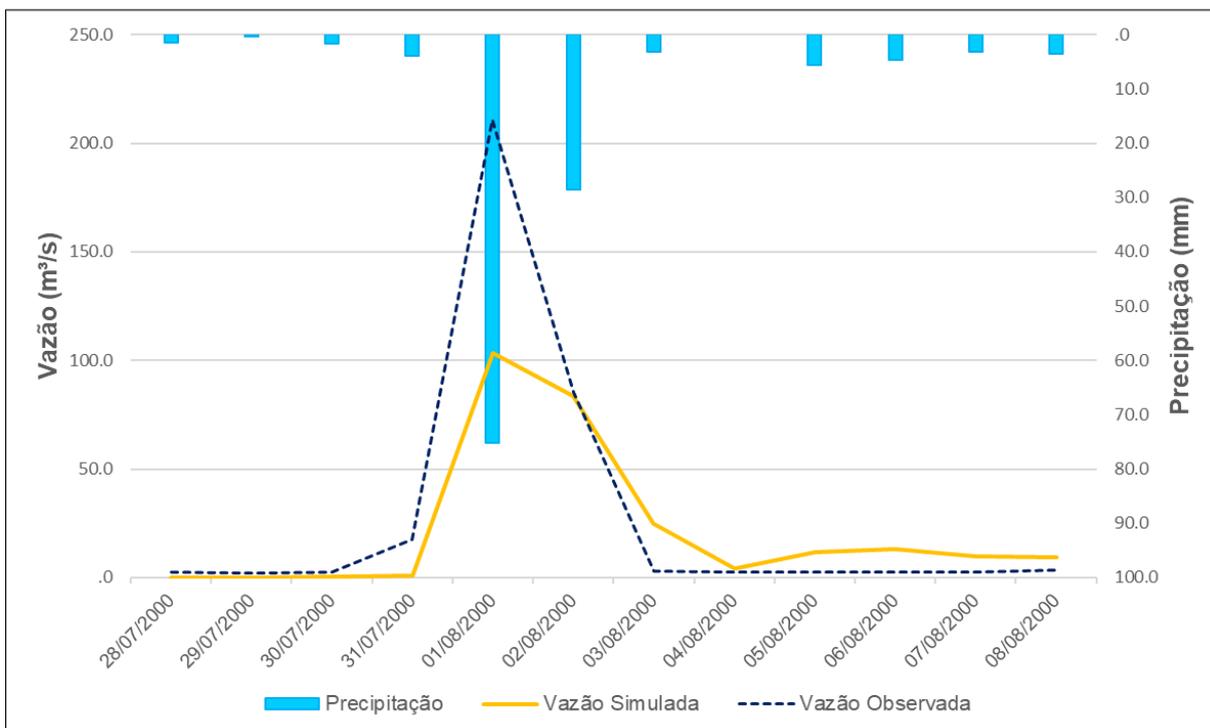
Nas Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34, observam-se os dados de chuva e vazão obtidos para os eventos de calibração e validação do modelo hidrológico:

Figura 29 – Hidrograma de cheia para o evento de maio de 2011 (calibração).



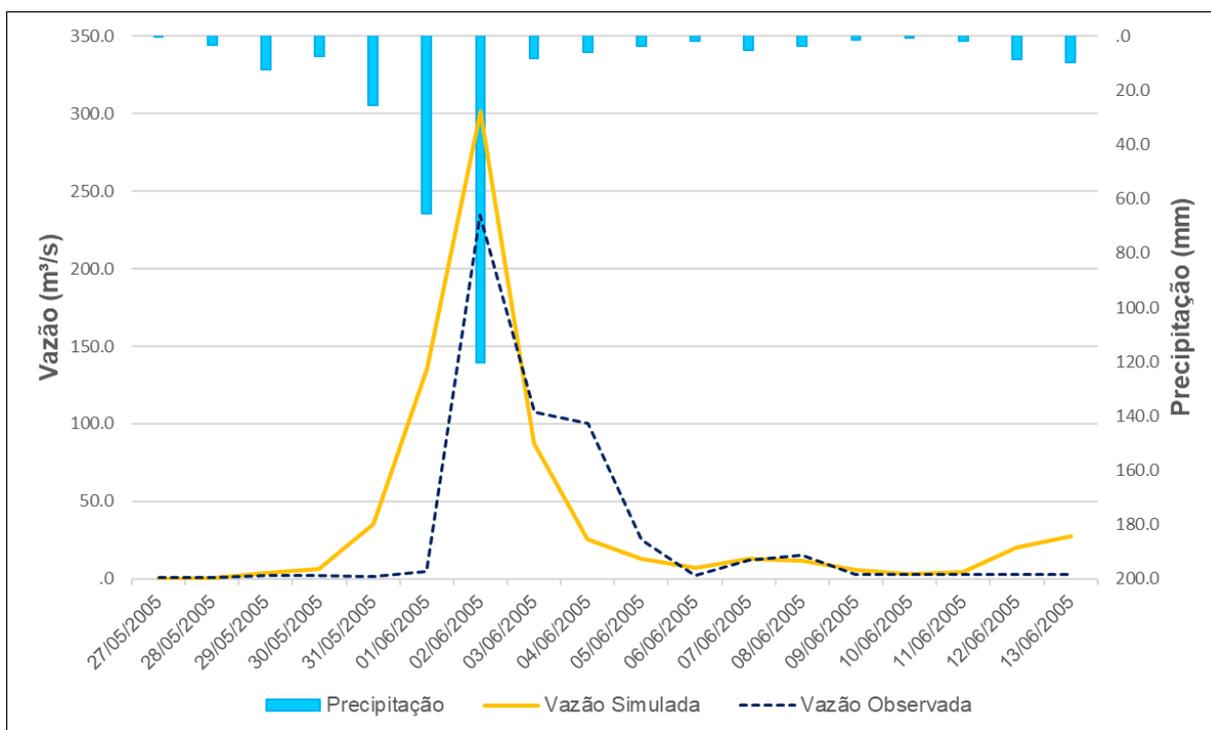
Fonte: O Autor (2023).

Figura 30 – Hidrograma de cheia para o evento de agosto de 2000 (validação).



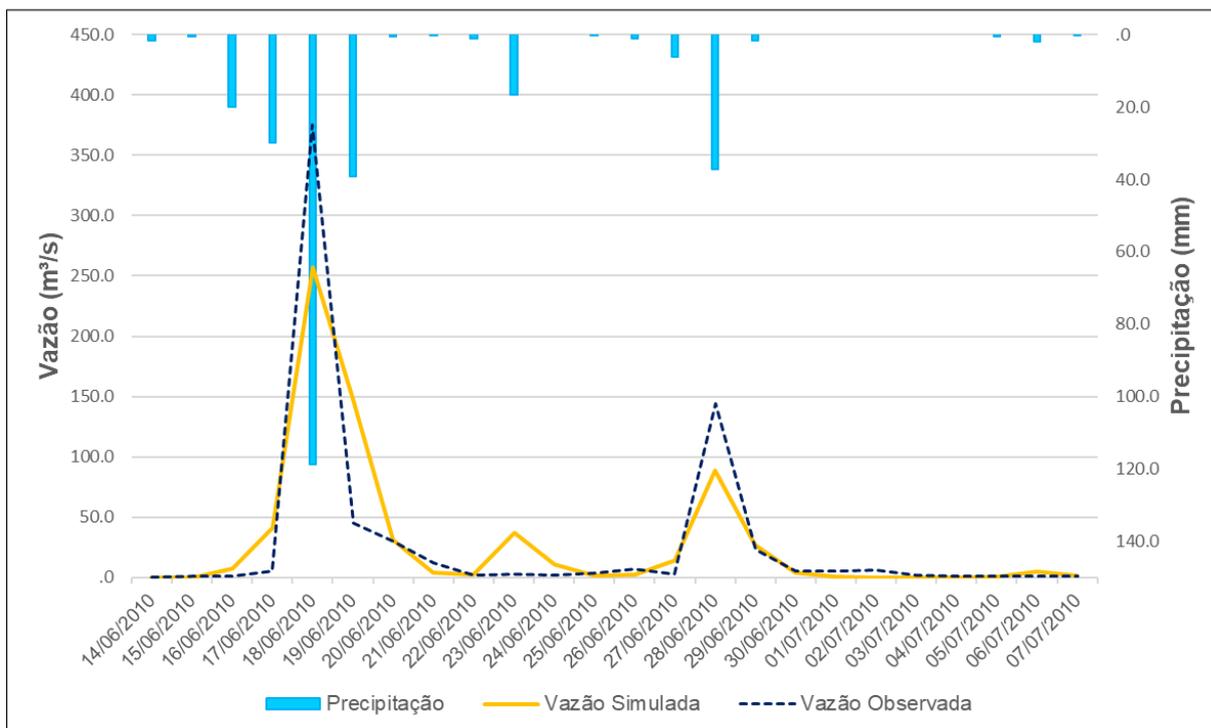
Fonte: O Autor (2023).

Figura 31 – Hidrograma de cheia para o evento de junho de 2005 (validação).



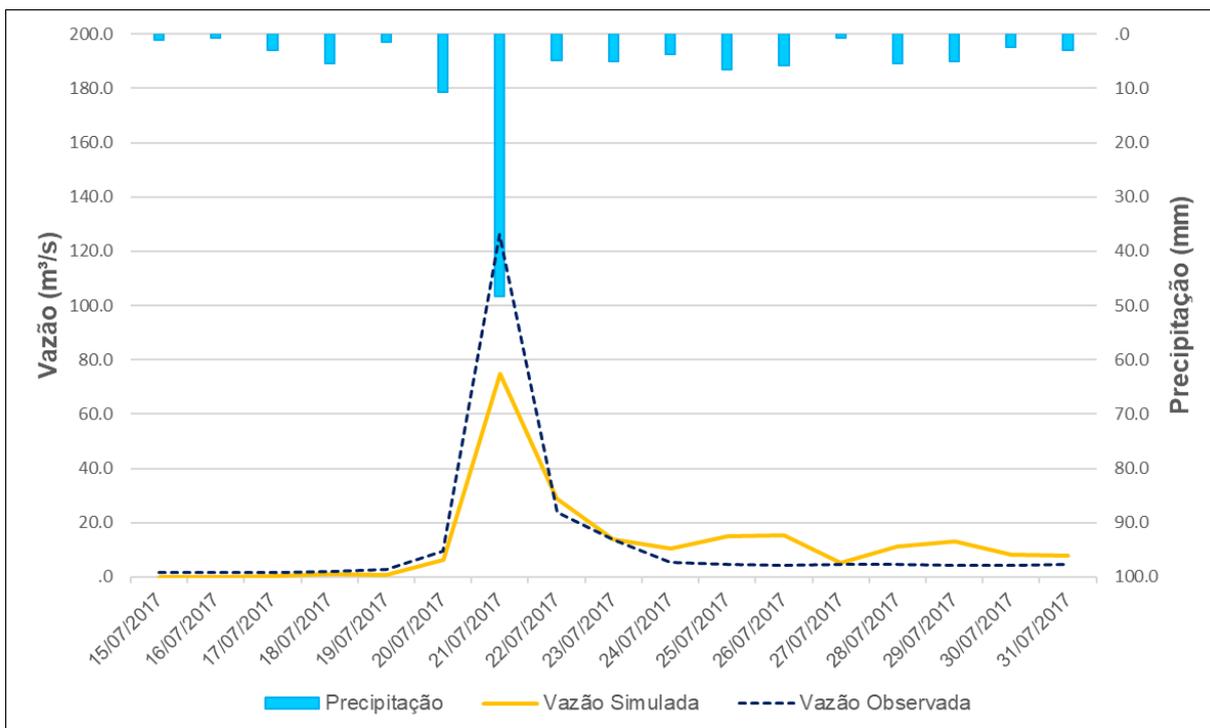
Fonte: O Autor (2023).

Figura 32 – Hidrograma de cheia para o evento de junho de 2010 (validação).



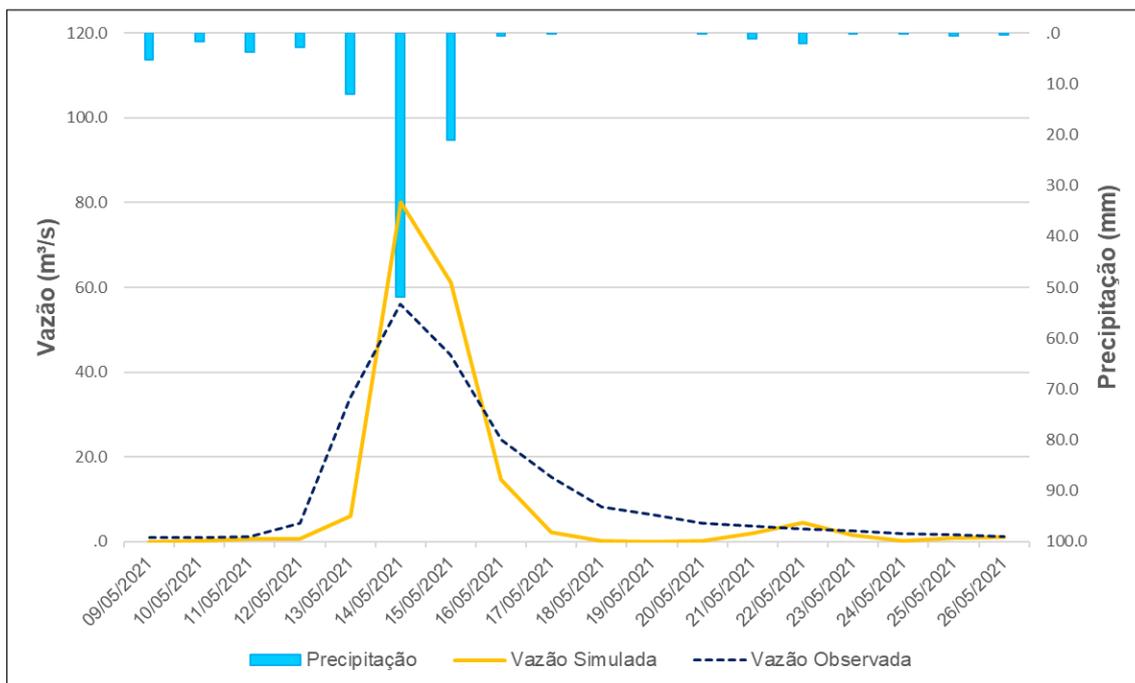
Fonte: O Autor (2023).

Figura 33 – Hidrograma de cheia para o evento de julho de 2017 (validação).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 34 – Hidrograma de cheia para o evento de maio de 2021 (validação).

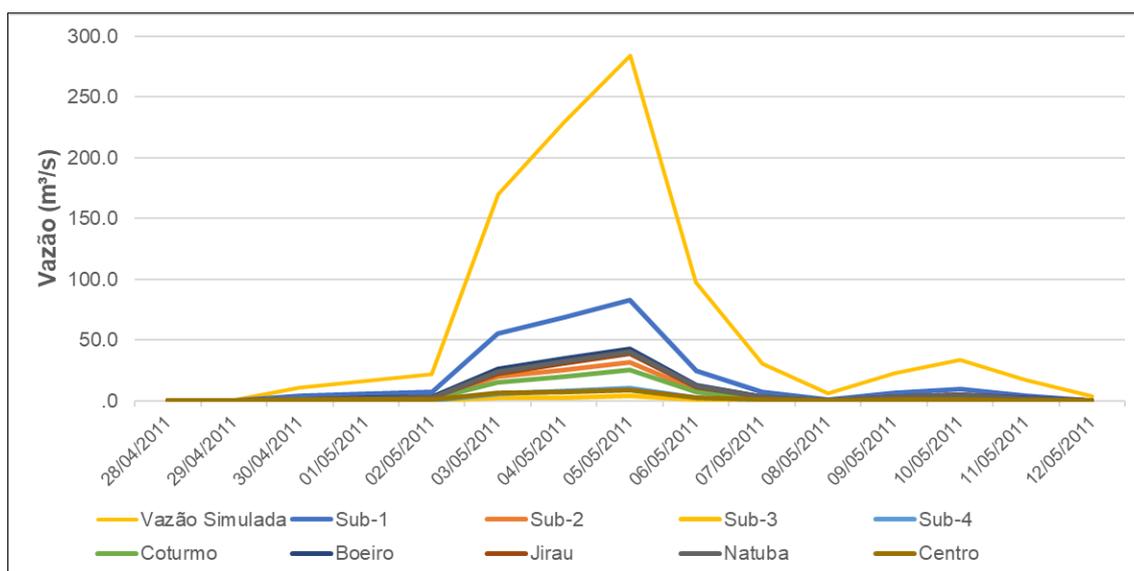


Fonte: O Autor (2023).

### 5.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na modelagem hidrológica foram gerados os hidrogramas de cada sub-bacia, além do hidrograma no exutório, conforme pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 – Hidrogramas gerados por sub-bacia no HEC-HMS, na bacia do Tapacurá, evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

A partir da Figura 35 é possível observar que a sub-bacia que mais contribuiu para o escoamento é a Sub-Tapacurá 1, que é uma condição esperada, visto que apesar de ser uma bacia rural, com baixa impermeabilização, trata-se da maior área de contribuição. A lógica se repete para as bacias do Boeiro, Natuba e Jirau, que aparecem na sequência com contribuições de vazão semelhante, sendo também sub-bacias com área de contribuição expressiva em relação a área total. Da mesma maneira, a Sub-Tapacurá 3, que possui a menor área, é a que menos contribuiu para o escoamento.

O resultado é compatível com o encontrado por Neves (2019), que encontrou que a sub-bacia do Riacho dos Macacos, com parcela impermeável de apenas 7,24% de sua área, é a que mais contribuiu para o escoamento simulado na modelagem hidrológica com HEC-HMS da bacia hidrográfica do rio Morno. O autor também verificou que existe uma relação direta entre área impermeabilizada e o volume de

perdas, ou seja, quanto maior for a impermeabilização de uma bacia, maior será a parcela de precipitação que se torna escoamento superficial.

Na Tabela 19, tem-se o volume precipitado, de perdas e o escoado em termos quantitativos para cada uma das sub-bacias.

Tabela 19 – Volume precipitado, de perdas e escoado em cada sub-bacia.

<b>Sub-bacia</b>	<b>Precipitação (1.000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de perdas (1.000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume escoado (1.000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>% que se tornou escoamento</b>
Riacho Boeiro	14.223,0	2.062,3	12.160,7	85,5%
Riacho do Jirau	13.293,6	2.536,0	10.757,6	80,9%
Rio Cortumo	8.417,1	1.360,3	7.056,8	83,8%
Rio Natuba	13.699,2	2.413,5	11.285,7	82,4%
Sub-Tapacurá 1	26.997,2	2.735,3	24.261,9	89,9%
Sub-Tapacurá 2	10.434,8	1.387,1	9.047,7	86,7%
Sub-Tapacurá 3	1.286,9	189,7	1.097,2	85,3%
Sub-Tapacurá 4	3.577,3	804,4	2.772,9	77,5%
Vitória Centro	2.936,1	97,6	2.838,5	96,7%

Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Tabela 19, fica claro o impacto da urbanização no processo de transformação chuva-vazão, na sub-bacia Vitória Centro aproximadamente 96,7% do volume precipitado foi convertido em escoamento superficial, enquanto sub-bacias menos urbanizadas, com a do Riacho do Jirau, por exemplo, teve 80,9% de volume precipitado convertido em escoamento.

Desse modo, fica claro a necessidade de se evitar o crescimento urbano desordenado nessas áreas, visto os potenciais problemas que chuvas intensas podem ocasionar.

O hidrograma do exutório definido no presente trabalho obteve uma vazão de pico de 284,2 m<sup>3</sup>/s e um volume de descarga de 81.598 (1.000 m<sup>3</sup>), sendo 275,9 m<sup>3</sup>/s a vazão de pico na entrada da última sub-bacia (Vitória Centro) e os 8,3 m<sup>3</sup>/s restantes foram produzidos na própria sub-bacia. O hidrograma de entrada da sub-bacia Vitória Centro e o hidrograma gerado na própria sub-bacia (Tabela 20) foram utilizados como condição de contorno de montante e interna, respectivamente, do modelo hidrodinâmico.

Tabela 20 – Hidrogramas simulados da sub-bacia Vitória Centro, evento maio/2011.

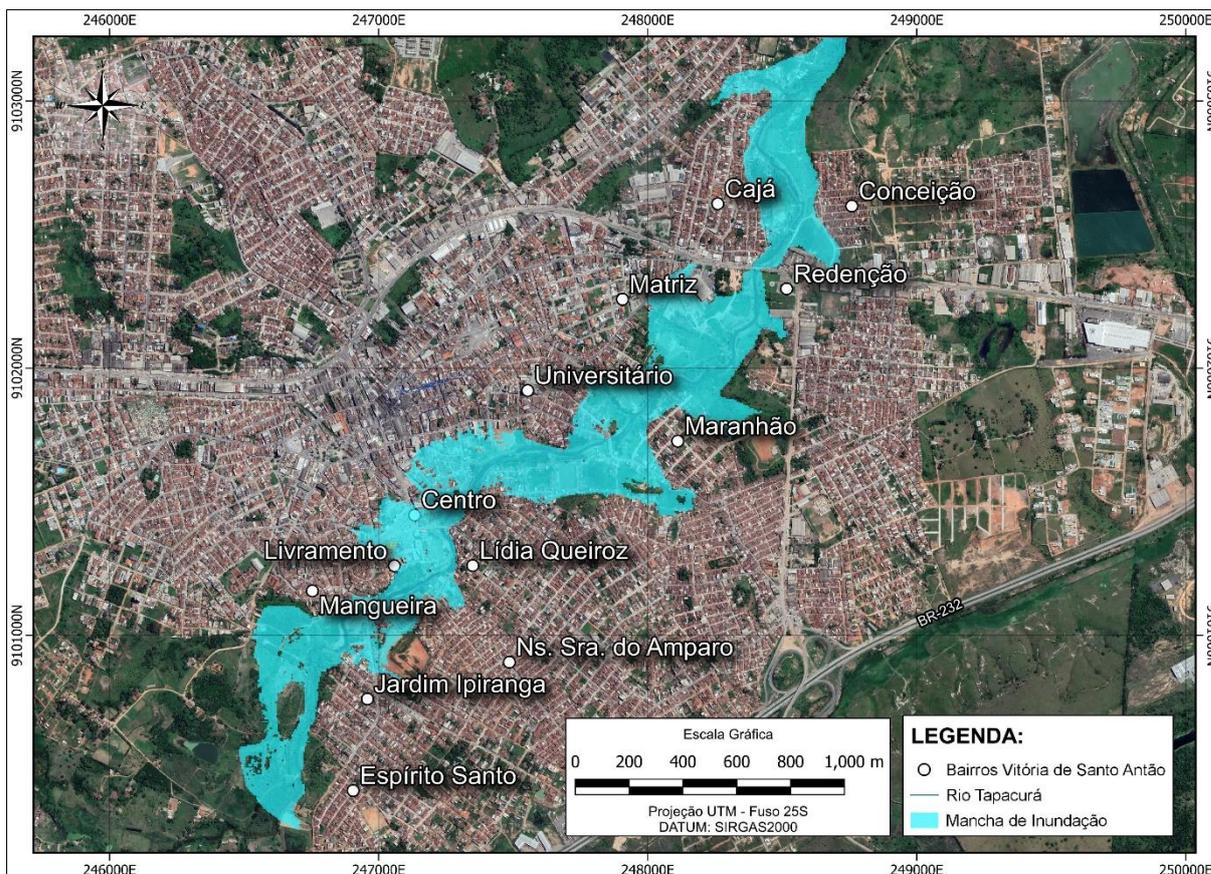
<b>Data</b>	<b>Vazão à montante</b>	<b>Vazão produzida em Vitória Centro</b>
28/04/2011	0	0
29/04/2011	0,5	0
30/04/2011	9,7	1,2
01/05/2011	15,5	1
02/05/2011	21	1,1
03/05/2011	163,1	6,6
04/05/2011	221,5	7,7
05/05/2011	275,1	9,2
06/05/2011	94,9	2,7
07/05/2011	30,1	0,8
08/05/2011	6,5	0,1
09/05/2011	21,8	0,8
10/05/2011	33	1,1
11/05/2011	17,1	0,5
12/05/2011	3,8	0,1

Fonte: O Autor (2023).

#### 5.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica do evento de maio de 2011 foi realizada para uma vazão de pico de 275,9 m<sup>3</sup>/s aplicada imediatamente à montante da sub-bacia Vitória Centro, considerado o ponto de entrada do hidrograma de cheia, além disso a contribuição lateral ao longo do rio resultante da área de contribuição da bacia urbana também foi levada em conta. A mancha de inundação simulada abrangeu uma área de aproximadamente 3,0 km<sup>2</sup>, atingindo áreas residenciais e comerciais ao longo da área urbana, conforme exibido na Figura 36.

Figura 36 – Área atingida pela inunda o do rio Tapacurá, evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

A mancha de inunda o atingiu praticamente todos os bairros que margeiam o rio Tapacurá, são eles: Jardim Ipiranga, Mangueira, Livramento, Lídia Queiroz, Centro, Universitário, Matriz, Maranhão, Redeno, Caj e Conceio.

As imediaoes da Ponte Jardim Ipiranga foram afetadas pela inunda o, apesar de ser uma das mais altas da cidade e não ter sua estrutura principal atingida, as cabeceiras dos dois lados ficaram de baixo d'água, impedindo a travessia por essa ponte. As ruas Padroeiro Santo Antão e Ubiratã Carneiro da Cunha, na parte sul da ponte do Jardim Ipiranga apresentaram lâmina d'água de até 1 m de profundidade (Figura 37), muito semelhante ao mostrado no registro fotográfico do evento de 2010 (Figura 4B). A calha do rio nesse ponto apresenta profundidade média de 5,00 m.

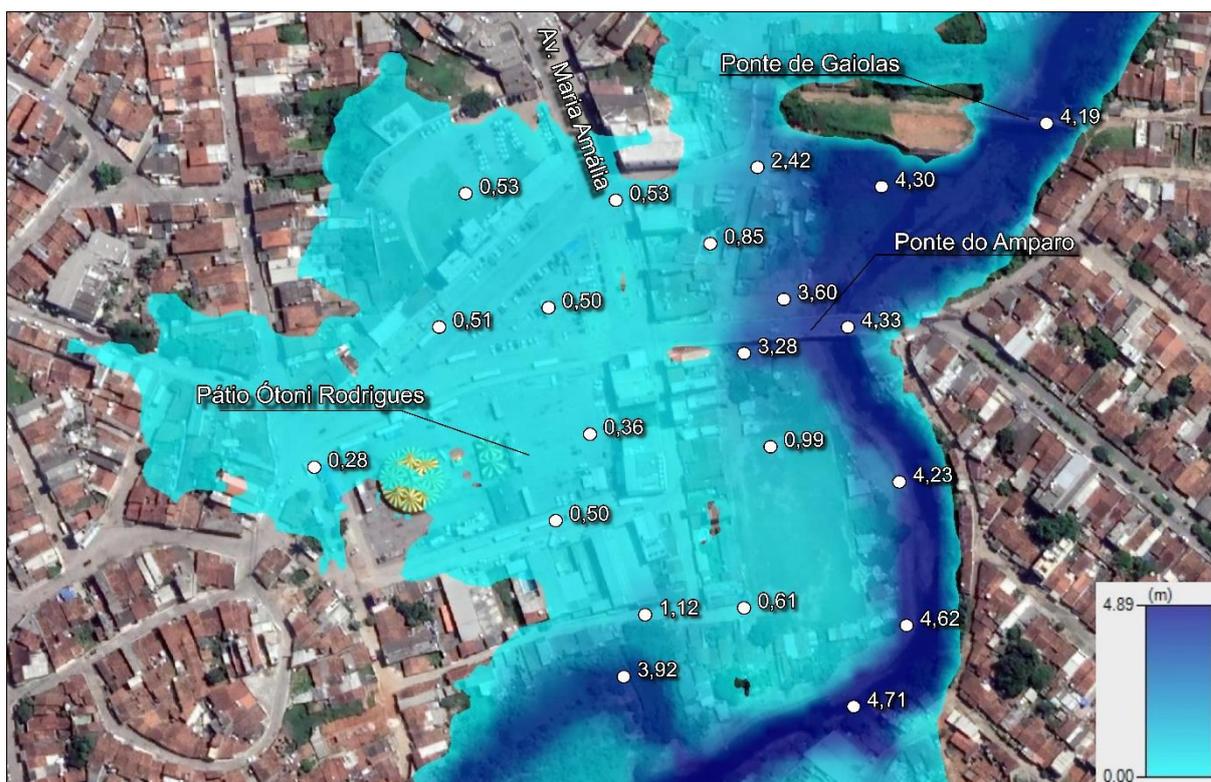
Figura 37 – Inundação simulada na Ponte Jardim Ipiranga, evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

No bairro do Centro e o Livramento, onde está localizado o maior centro comercial do município, a mancha de inundação se estendeu por mais de 300 m do leito normal do rio Tapacurá. O pátio de eventos Otóni Rodrigues, edifícios comerciais e residenciais no entorno, além do início da Avenida Mariana Amália ficaram completamente alagados, apresentando lâminas d'água na ordem de 50 centímetros. A área de várzea na cabeceira esquerda da Ponte do Amparo apresenta pontos com lâmina d'água de mais de 3 m (Figura 38), representando um sério risco a pessoas e imóveis. O campo do Treze, abaixo da ponte do Amparo, apresentou alagamentos com profundidades de 1 m, com lâminas cada vez maiores na direção do rio. O modelo ainda retornou que a cota da água, no pico da inundação foi suficiente para alcançar a estrutura da ponte do Amparo, o que está alinhado com o demonstrado no evento de 2011, em que essa ponte (ainda em reconstrução depois das chuvas de junho de 2010) foi novamente destruída pela força das águas (como exibe o registro fotográfico da Figura 5).

Figura 38 – Inundação simulada próximo a Ponte do Amparo, evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

A partir da Ponte de Gaiolas, a mancha de inundação começa a se espalhar mais na direção transversal ao eixo do rio, chegando a alagar ruas a mais de 400 m da calha do rio. Na margem esquerda do rio, após a Ponte de Gaiolas, uma área de pouco mais de 7 ha entre o Tapacurá e a rua Primitivo de Miranda é inundada, sendo essa uma área densamente populada, contando com comércios e residências (Figura 39).

O bairro Matriz é o mais atingido em área, praticamente todas as casas entre a rua que dá acesso à Ponte de Gaiolas, na margem direita do rio, até a rua Maranhão, que dá acesso à Ponte do Dique, foram atingidas pela água.

A simulação mostra que a cota de inundação superou o greide da Ponte do Dique, sendo isso um risco elevado para a integridade estrutural da mesma. As casas localizadas nas ruas Maranhão e Major Lins foram as mais atingidas, com lâmina d'água de até 0,9 m (Figura 39). Os resultados encontrados na simulação foram compatíveis com os danos registrados em eventos anteriores, como evidencia o registro fotográfico do evento de 2005 em que a estrutura da Ponte do Dique foi comprometida após a enchente do rio Tapacurá (Figura 3).

Apesar de a mancha de inundação no entorno da Ponte do Galucho não ter se espalhado com tanta abrangência, como ocorre na área de várzea imediatamente à montante, visto que logo após a ponte foram executados aterros próximos as margens do rio que impedem que a água transborde, a cota de água ainda é suficiente para impedir o trânsito no principal acesso da cidade, como ocorreu no evento de 2010 (Figura 4).

Na Figura 39, observa-se a mancha de inundação entre a Ponte de Gaiolas e a Ponte do Galucho.

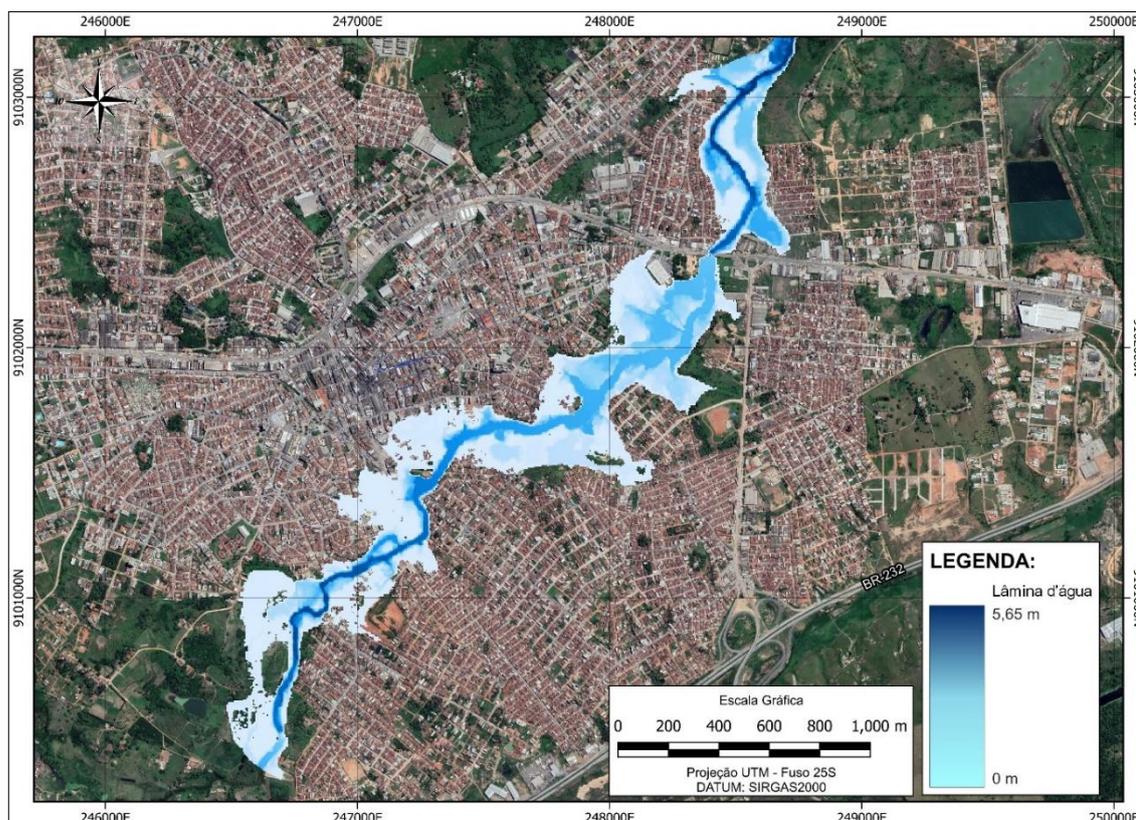
Figura 39 – Inundação simulada entre as pontes de Gaiolas e do Galucho, evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

Para a elaboração dos mapas de perigo, é fundamental a informação detalhada a respeito da profundidade da lâmina d'água e da velocidade de escoamento. Na Figura 40, tem-se o resultado obtido para a profundidade máxima da água durante o evento simulado através do HEC-RAS.

Figura 40 – Profundidade máxima da água (m), evento de maio/2011.

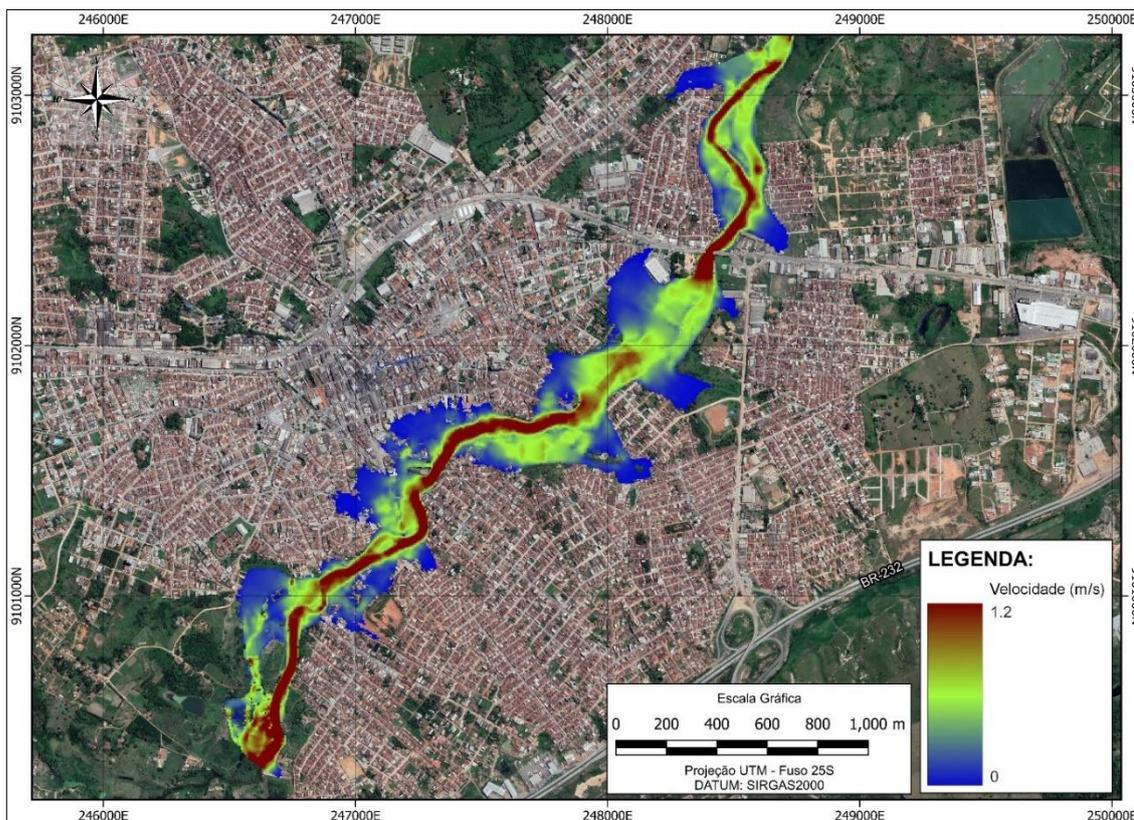


Fonte: O Autor (2023).

Naturalmente, a lâmina d'água atingiu seus maiores valores ao longo da calha do rio, sendo 5,65 m o maior valor registrado na simulação no trecho localizado no bairro do Cajá, mais à jusante da área urbana. Recebe destaque as áreas de Várzea próximo a Ponte do Amparo e na margem esquerda do bairro Matriz, antes da Ponte do Galucho, com profundidade média de mais de 2 m.

Na Figura 41, observa-se o resultado da velocidade de escoamento máxima obtida através da simulação hidrodinâmica no HEC-RAS. É possível se observar que as maiores velocidades ocorrem ao longo da calha do rio, havendo uma desaceleração quando a inundação passa pelo bairro Matriz devido à grande área de Várzea que causa um efeito de retenção na onda de cheia, porém após a Ponte do Galucho, onde há um estreitamento da calha do rio, a velocidade da água aumenta novamente.

Figura 41 – Velocidade máxima da água (m/s), evento de maio/2011.



Fonte: O Autor (2023).

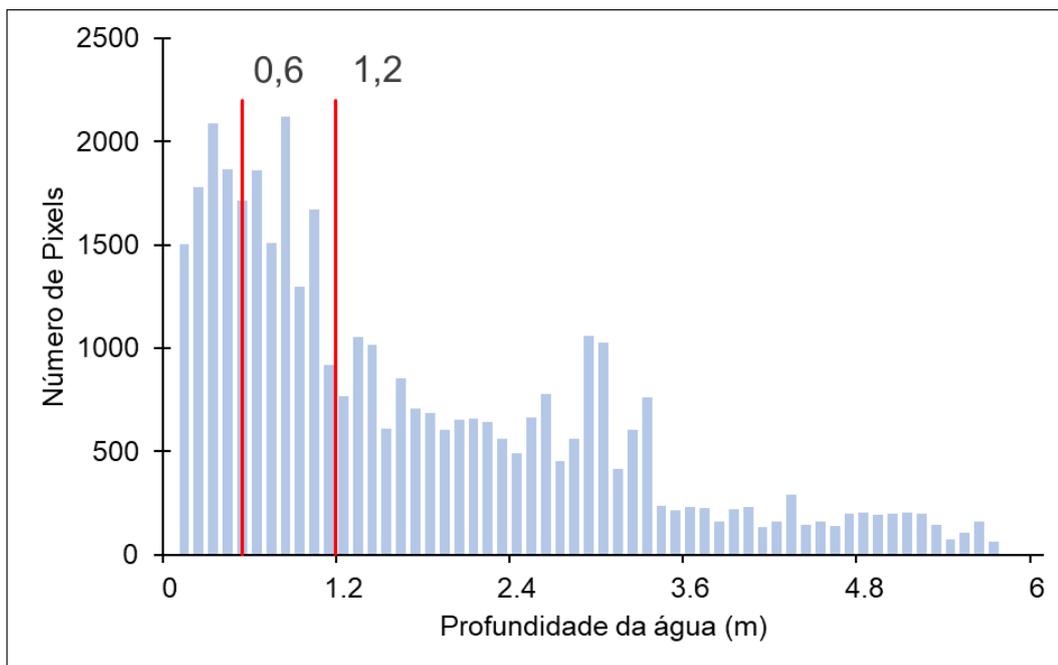
## 5.5 MAPAS DE PERIGO

Nesse item será apresentado os mapas de indicadores de perigo obtidos através da metodologia detalhada no item 4.7 do presente trabalho.

### 5.5.1 Profundidade da água

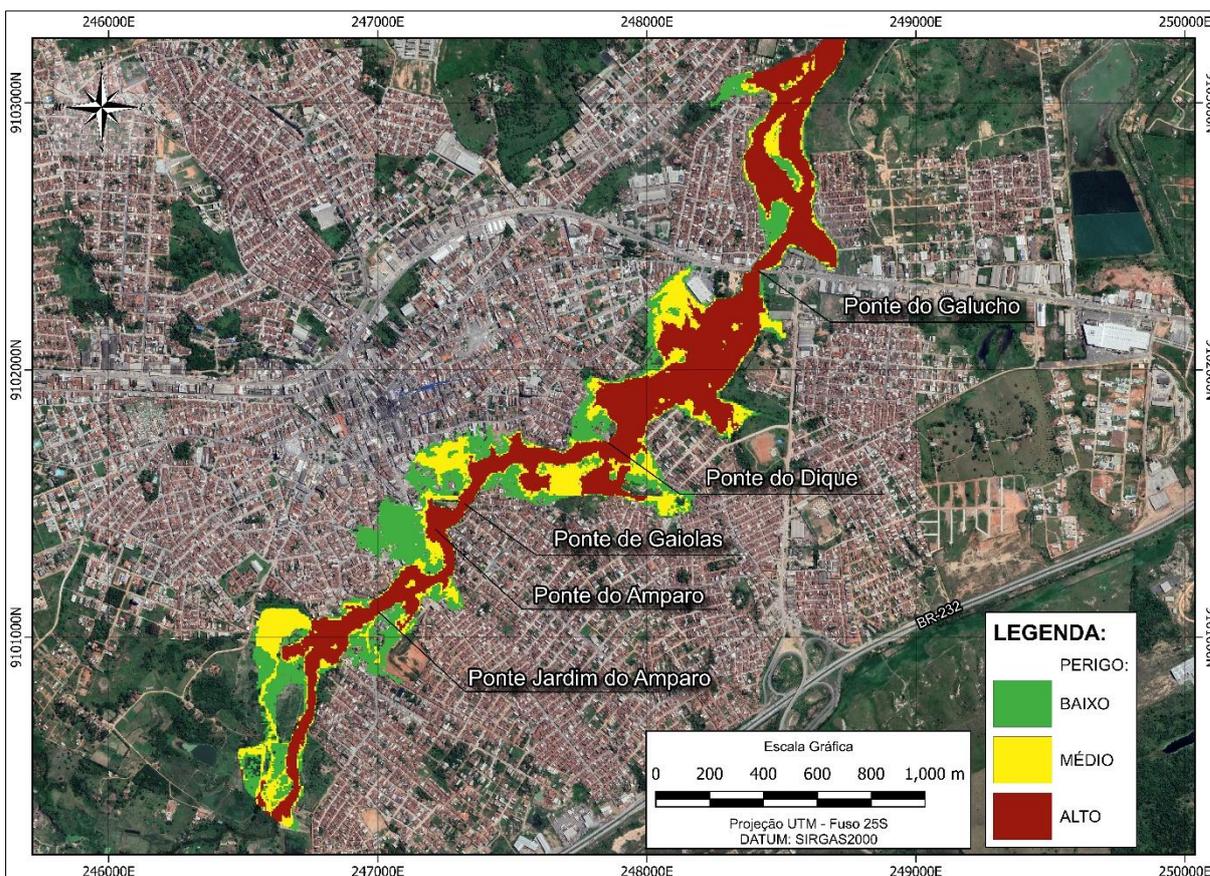
Quanto ao perigo relacionado a profundidade da água, a modelagem hidrodinâmica resultou num total de 10.806 pixels com valor de profundidade menor ou igual a 0,6 m, o equivalente a 28,2% da área inundada. Já o intervalo com pixels com valores maiores que 0,6 m e menores ou iguais a 1,2 m equivalem a 21,6% e, por fim, a maior parte dos pixels da área inundada (50,1%) possuem valores de profundidade da água maiores que 1,2 m. Na Figura 42, tem-se a frequência de distribuição dos pixels por valor de profundidade, enquanto na Figura 43 observa-se o mapa de perigo relacionado ao mesmo indicador.

Figura 42 – Distribuição de frequência da profundidade da água (m).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 43 – Mapa indicador perigo – Profundidade da água máxima (m).



Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Figura 43, verifica-se a predominância de perigo alto ( $> 1,20$  m) ao longo de toda a extensão do rio dentro da área urbana, com poucas áreas de risco médio ( $> 0,60$  m e  $\leq 1,20$  m) e com áreas de perigo baixo ( $\leq 0,60$  m) nas regiões mais transversalmente distantes do eixo do rio.

As zonas de alto perigo compreendem a calha do rio e as áreas de várzea que existem próximas a Ponte do Amparo e à montante da Ponte do Galucho, as demais áreas da cidade, já aterradas, estão menos susceptíveis ao perigo devido a profundidade da água. Ainda assim, regiões muito habitadas como nas proximidades da rua Maria Amália, no bairro do Centro, além de ruas localizadas próximo as margens do rio como a rua Major Lins, rua Maranhão e a travessa Des. Pedro Beltrão, no bairro do Cajá, estão em zonas que apresentam algum grau de perigo.

Mesmo com a classificação de perigo baixo, essas áreas não devem ser ignoradas, visto que dependendo das características de cada pessoa e da superfície de contato, pequenas lâminas d'água podem reduzir suficientemente o atrito pessoa-superfície ao ponto de ocasionar escorregamento (ROTAVA *et al.*, 2013).

Kreibich *et al.* (2009) argumentam que a profundidade da água exerce forte influência nos danos ocasionados a edifícios residenciais, além de exercer moderada influência nos danos a estrutura de estradas e nas perdas monetárias devido a interrupções de negócios.

O comportamento desse indicador se mostrou compatível com outros trabalhos de natureza semelhante, a exemplo do realizado por Ribeiro Neto *et al.* (2016), onde no mapa de perigo relativo à profundidade da água, os pontos mais críticos estão localizados ao longo da calha do rio principal, além disso, braços de rio e as planícies de inundação apresentam o perigo relativamente mais alto que as áreas mais afastadas do eixo do rio.

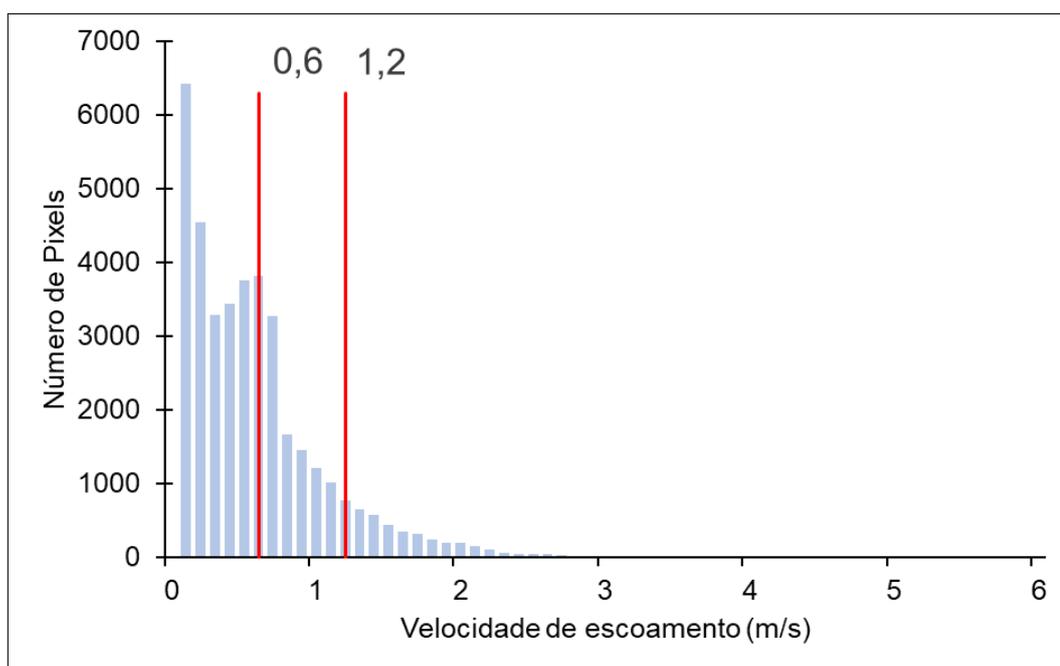
O indicador de perigo relativo à profundidade é frequentemente utilizado para avaliar os danos resultantes do evento extremo, Batista *et al.* (2020) utilizaram esse parâmetro numa equação que relaciona a profundidade da água com o dano por unidade de área em R\$/m<sup>2</sup>, naturalmente, quanto maior a profundidade maior é o dano associado. Desse modo, a predominância de indicadores altos e médios de perigo, principalmente numa região majoritariamente residencial como a escolhida no presente estudo, corrobora com a influência que esse indicador possui nos danos potenciais associados a inundações.

### 5.5.2 Velocidade de escoamento

Para o perigo relacionado a velocidade de escoamento da água, a modelagem hidrodinâmica resultou num total de 25.278 pixels com valor de velocidade menor ou igual a 0,6 m/s, sendo o intervalo mais representativo do total, equivalente a 66,0% da área inundada. Já o intervalo com pixels com valores maiores que 0,6 m/s e menores ou iguais a 1,2 m/s equivalem a 24,5% e, por fim, a menor parte dos pixels da área inundada (9,4%) possuem valores de velocidade de escoamento da água maiores que 1,2 m/s.

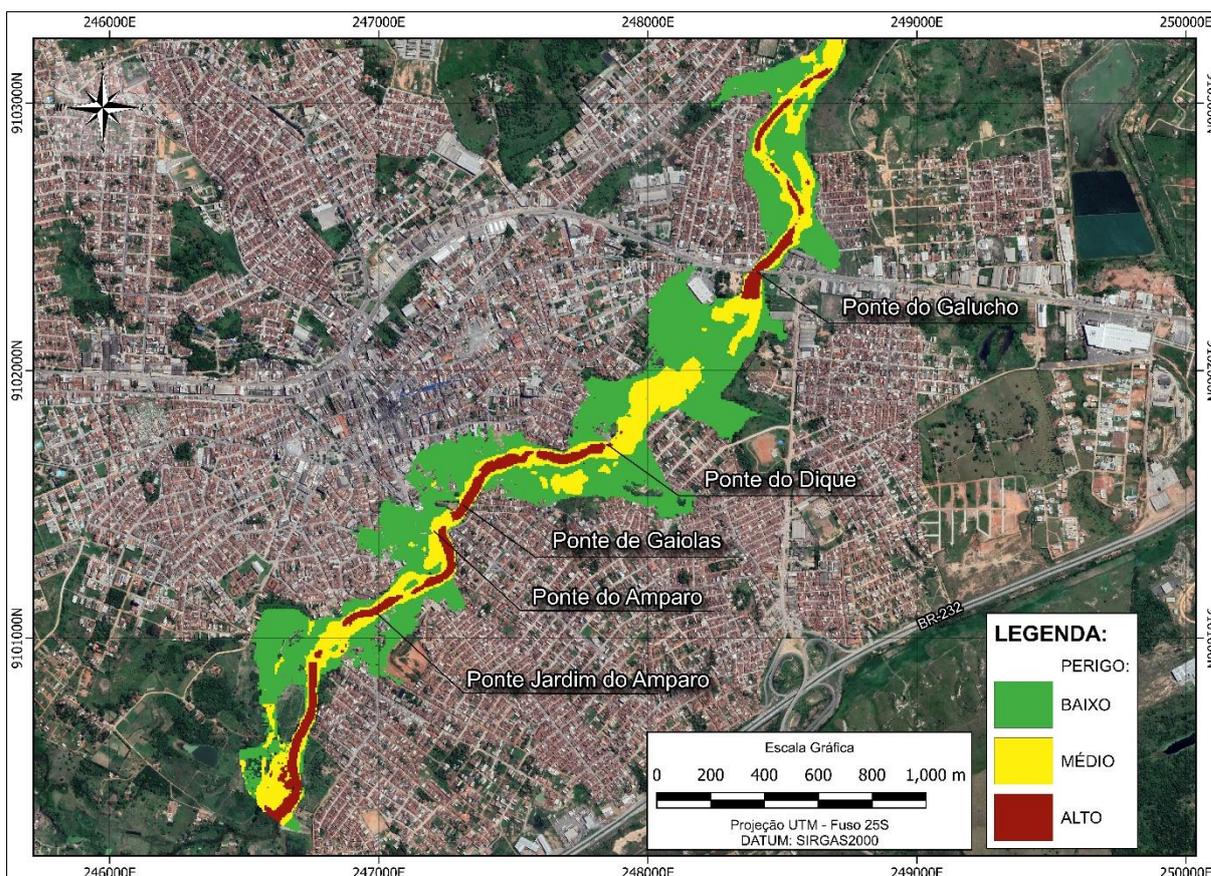
Na Figura 44 tem-se a frequência de distribuição dos pixels por valor de velocidade de fluxo, já na Figura 45, observa-se o mapa de perigo relacionado ao mesmo indicador.

Figura 44 – Distribuição de frequência da velocidade de escoamento (m/s).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 45 – Mapa indicador de perigo – Velocidade de escoamento máxima (m/s).



Fonte: O Autor (2023).

Na Figura 45, observa-se o mapa indicador de perigo devido a velocidade da água. Nele é possível observar que há a predominância de baixo perigo ( $\leq 0,6$  m/s) ao longo de toda a extensão urbana do rio Tapacurá, em especial nas áreas de várzea (conhecidas como leito maior ou leito de inundação), reforçando a importância da não-ocupação e conservação dessas regiões.

As regiões de alto perigo em relação a velocidade de escoamento da água ( $\geq 1,2$  m/s) ocorrem ao longo da calha do rio. Com destaque para a travessia da Ponte do Galucho, onde ocorre um estreitamento da seção hidráulica do rio devido a aterros construídos em direção às margens que causam o aumento da velocidade de escoamento, causando impactos mais a jusante.

A velocidade de escoamento tem um forte impacto nos danos causados a infraestrutura rodoviária, porém não exerce diretamente um papel tão grande nos danos causados a edificações (KREIBICH *et al.*, 2009).

A classificação de perigo está de acordo com o trabalho produzido por Wright (2008), que afirma que inundações com profundidade da água maior que 0,6 m e/ou

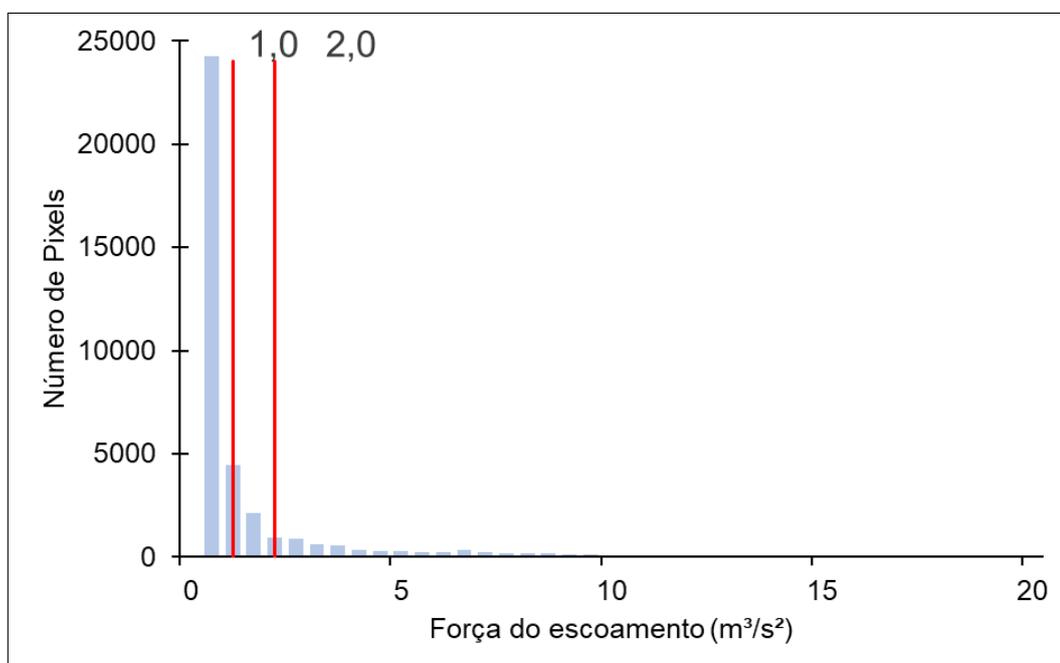
velocidade de escoamento acima de 1,2 m/s já representam perigo definitivo para as pessoas. Nesse mesmo raciocínio de discussão, Vieira *et al.* (2018) ressaltam que velocidades de aproximadamente 1,5 m/s e lâmina d'água menores que 0,1 m já são suficientes para deixar uma pessoa susceptível a deslizar.

### 5.5.3 Força máxima do escoamento

Para o perigo relacionado a força máxima da água, a modelagem hidrodinâmica resultou num total de 28.690 pixels com valor de força menor ou igual a  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}^2$ , sendo o intervalo mais representativo do total, equivalente a 75,0% da área inundada. Já o intervalo com pixels com valores maiores que  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}^2$  e menores ou iguais a  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}^2$  equivalem a 8,0% do total, sendo esse intervalo o que ocorre em menor frequência e, por fim, 17,1% da área inundada possuem valores de força do escoamento da água maiores que  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}^2$ .

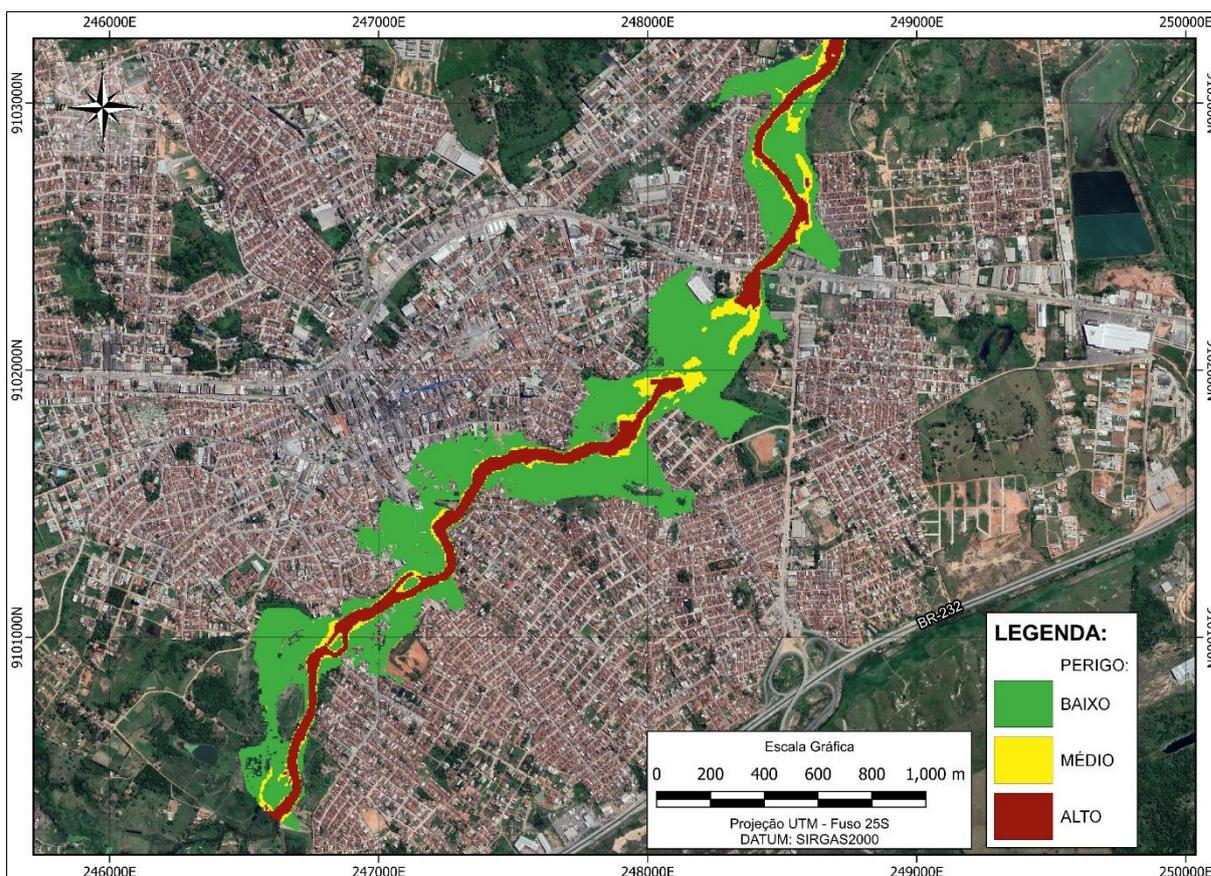
Na Figura 46 observa-se a frequência de distribuição dos pixels por valor de força máxima do escoamento, enquanto na Figura 47 observa-se o mapa indicador de perigo relativo a esse indicador.

Figura 46 – Distribuição de frequência da força do escoamento ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ ).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 47 – Mapa indicador de perigo – Força do escoamento máxima ( $m^3/s^2$ ).



Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Figura 46, é possível observar que a força do fluxo da água apresenta, no geral, um perigo baixo ao longo de toda a mancha de inundação. A ocorrência de perigo alto basicamente se limitou a calha do rio, com poucas regiões apresentando perigo médio nas regiões próximas das margens do rio Tapacurá.

O comportamento da força do escoamento se mostrou condizente com o trabalho de Neves (2019), que realizou simulação hidrológica e hidrodinâmica para uma sub-bacia do Rio Beberibe e encontrou valores mais elevados de força do escoamento na calha do rio, com rápida redução nos valores à medida que se afasta da calha do mesmo.

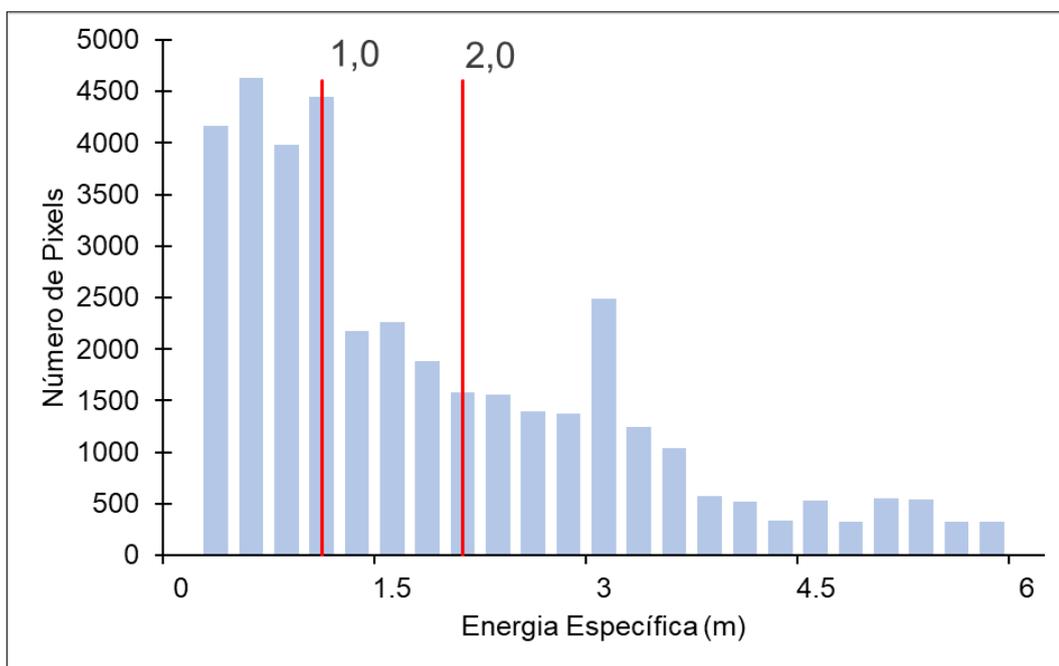
De acordo com Kreibich *et al.* (2009), valores de força de fluxo superiores a  $2 m^3/s^2$  representam um aumento significativo do perigo, portanto, é considerado o limiar entre perigo médio e alto. Ainda segundo os autores, esse indicador exerce forte influência nos danos causados ao sistema viário urbano.

### 5.5.4 Energia específica da água

Para o perigo resultante da energia específica da água, a modelagem hidrodinâmica resultou num total de 17.222 pixels com valor de energia menor ou igual a 1,0 m, sendo o intervalo mais representativo do total, equivalente a 45,0% da área inundada. Já o intervalo com pixels com valores maiores que 1,0 m e menores ou iguais a 2,0 m equivalem a 20,6% do total, sendo esse intervalo o que ocorre em menor frequência e, por fim, 34,4% da área inundada possuem valores de energia específica maiores que 2,0 m. Esse indicador apresentou uma distribuição razoavelmente equilibrada entre as três faixas apresentadas.

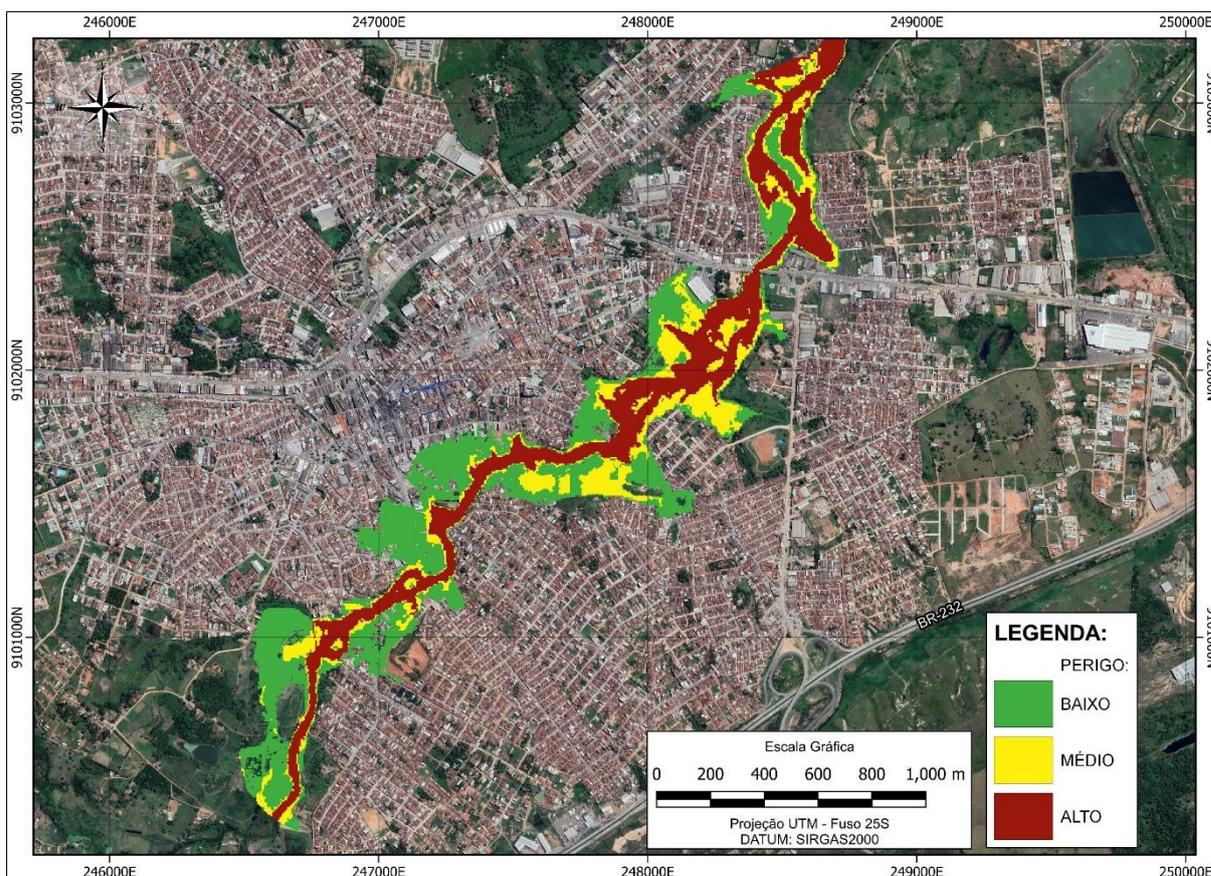
Na Figura 48, observa-se a frequência de distribuição dos pixels por valor de energia específica máxima, enquanto na Figura 49 tem-se o mapa indicador de perigo relativo a esse indicador, deixando claro como essa distribuição de frequência está espacialmente organizada.

Figura 48 – Distribuição de frequência da energia específica da água (m).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 49 – Mapa indicador de perigo – Energia Específica máxima (m).



Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Figura 49, percebe-se que o perigo variou de maneira equilibrada entre baixo, médio e alto ao longo da mancha de inundação estudada, entretanto, é possível observar uma predominância do perigo mais baixo na porção mais à montante da cidade, enquanto após a ponte do Dique, o perigo se mostra, majoritariamente, variando entre médio e alto. Além disso, como era de se esperar, os maiores valores de energia específica se encontram ao longo da calha do rio e diminuem à medida que se afasta transversalmente de seu eixo.

Ao observar o resultado encontrado no presente trabalho para o comportamento desse indicador de perigo, ressalta-se que está de acordo com outros trabalhos de natureza semelhante, a exemplos de Ribeiro Neto *et al.* (2016) e Neves (2019) também encontraram valores de energia específica relativamente bem distribuídas ao longo de todo o intervalo (apesar de haver uma predominância dos valores mais baixos).

De acordo com Kreibich *et al.* (2009), valores de energia específica superiores a 2 m representam um aumento significativo do perigo. Ainda segundo os autores,

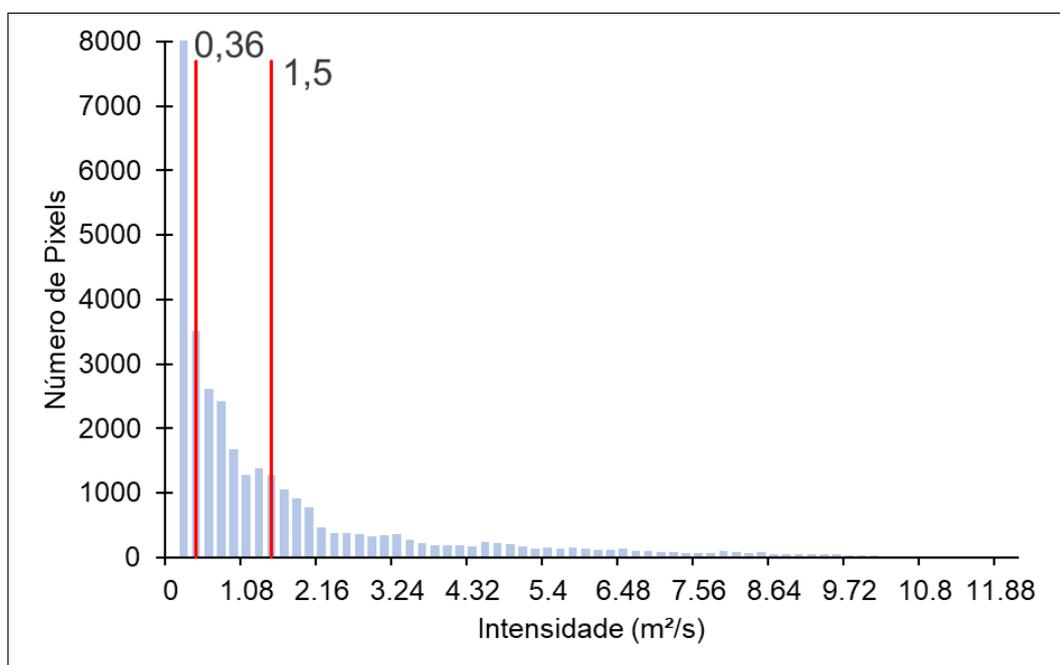
esse indicador exerce forte influência nos danos causados às edificações e uma moderada influência nos danos causados a estradas, desse modo, o indicador de energia deve ser atentamente observado na seleção de áreas adequadas ao desenvolvimento urbano afim de se evitar perdas monetárias e de vidas no caso de uma inundação.

### 5.5.5 Intensidade

Para o perigo resultante da intensidade, a modelagem hidrodinâmica resultou num total de 17.546 pixels com valor de intensidade menor ou igual a  $0,36 \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo o intervalo mais representativo do total, equivalente a 45,8% da área inundada. Já o intervalo com pixels com valores maiores que  $0,36 \text{ m}^2/\text{s}$  e menores ou iguais a  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$  equivalem a 27,8% do total e, finalmente, 26,0% da área inundada possuem valores de intensidade maiores que  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

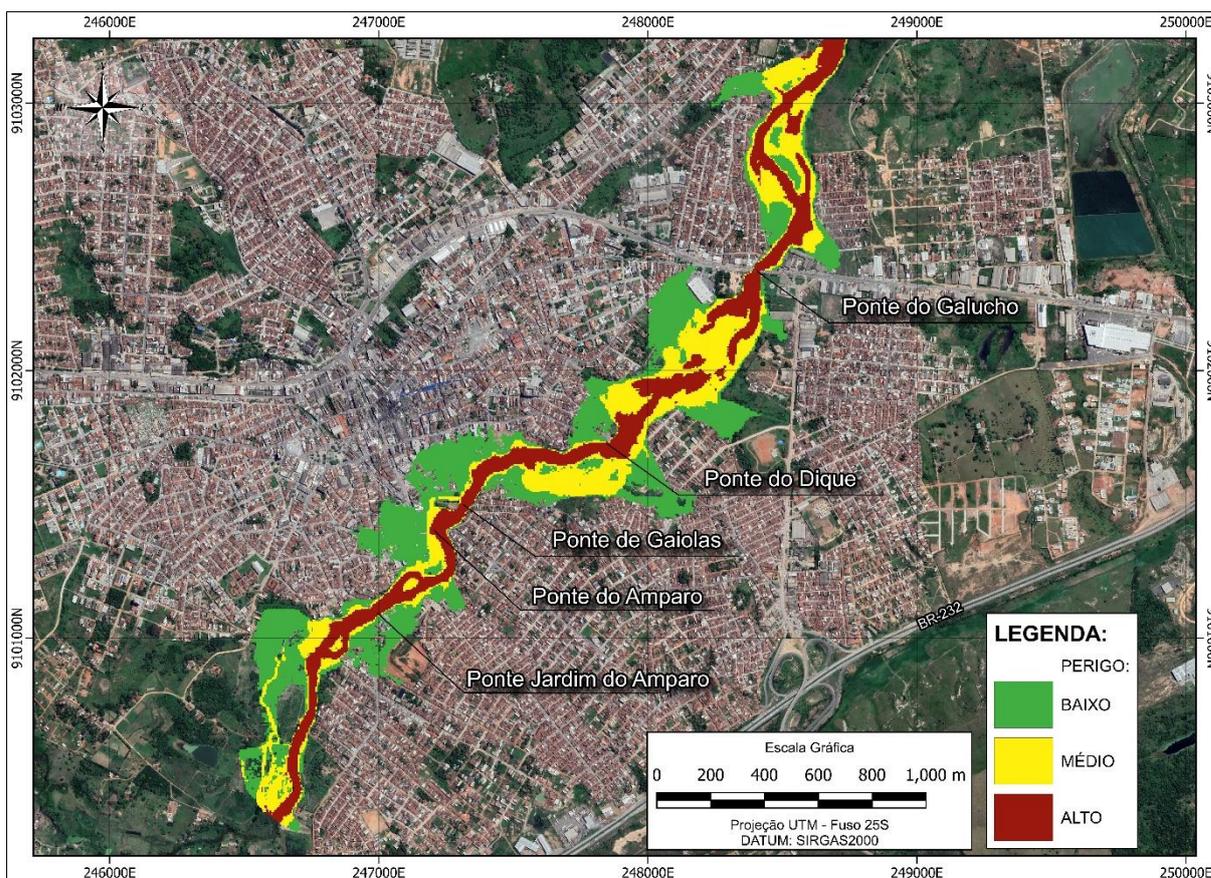
Na Figura 50 tem-se a frequência de distribuição dos pixels por valor de intensidade máxima, enquanto na Figura 51, observa-se o mapa indicador de perigo relativo a esse indicador.

Figura 50 – Distribuição de frequência da intensidade ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).



Fonte: O Autor (2023).

Figura 51 – Mapa indicador de perigo – Intensidade máxima (m<sup>2</sup>/s).



Fonte: O Autor (2023).

Analisando a Figura 51, é possível concluir que há uma predominância de perigo alto ao longo da calha do rio com diminuição desse perigo ao passo em que se afasta do eixo. As regiões de médio perigo se encontram concentradas nas áreas do leito maior de inundação entre a ponte de Gaiolas e a ponte do Galucho, mas também em menor frequência nos demais trechos do rio. As regiões mais afastadas da calha, naturalmente, foram classificadas como baixo perigo relativo à intensidade.

De acordo com Kreibich *et al.* (2009), valores de intensidade superiores a 1,5 m<sup>2</sup>/s representam um aumento significativo do perigo. Ainda segundo os autores, esse indicador exerce forte influência nos danos causados às infraestruturas rodoviárias.

Segundo Stephenson (2002), valores de intensidade menores que 0,5 m<sup>2</sup>/s já podem causar danos às propriedades, veículos inseguros e pode impossibilitar a capacidade de autoajuda de pessoas. Já valores entre 0,5 m<sup>2</sup>/s e 1,0 m<sup>2</sup>/s representam um perigo definitivo para as pessoas e valores de intensidade superiores

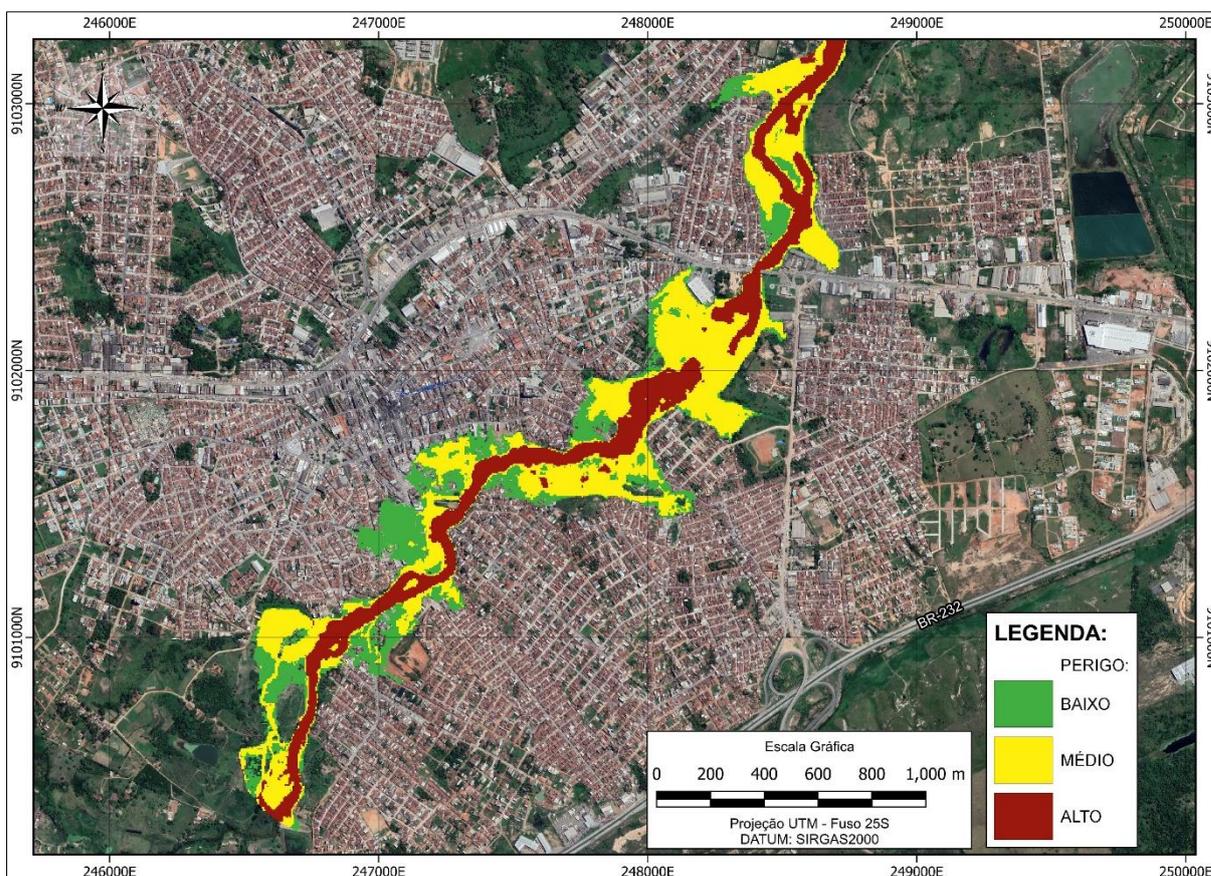
a  $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$  já incluem danos estruturais e erosão. Desse modo, a classificação demonstrada no presente trabalho corrobora com o trabalho do autor citado.

### 5.5.6 Combinação profundidade/velocidade

O indicador de perigo resultante da combinação da profundidade e velocidade, obtido a partir da metodologia desenvolvida por Ribeiro Neto *et al.* (2016), apresentou um total de 26,2% da área na classe 1 (perigo baixo), 45,6% na classe 2 (perigo médio) e os 28,2% restantes na classe 3 (perigo alto).

Na Figura 52 observa-se o mapa de perigo obtido para a combinação dos indicadores de profundidade e velocidade. Conforme é possível observar, na Figura 52 há a predominância de perigo médio ao longo de todo o trecho de rio estudado. As regiões de alto perigo se encontram majoritariamente ao longo da calha do rio, onde esse valor vai diminuindo a medida em que se afasta do eixo.

Figura 52 – Mapa indicador de perigo – Combinação profundidade/velocidade.



Fonte: O Autor (2023).

Quando comparado com o resultado obtido no trabalho de Miranda *et al.* (2017), que analisaram aspectos morfométricos (como declividade do terreno e densidade da rede de drenagem) da bacia hidrográfica do rio Tapacurá para ser obter um mapa de perigo de inundação para a sede urbana do município, observa-se que os indicadores obtidos no presente trabalho se mostraram compatíveis. Os pontos registrados na Tabela 2, utilizados pelos referidos autores como pontos de controle, apresentaram classificação de perigo variando entre médio e alto. Os pontos de alto perigo (1, 2, 4, 6 e 7) estão localizados próximos a calha do rio Tapacurá, o que corrobora com os resultados encontrados a partir de simulação hidrológica e hidrodinâmica 2D feitas no presente trabalho.

Recomenda-se aos órgãos gestores utilizarem de todos os mapas aqui apresentados para a escolha de áreas para desenvolvimento urbano, além de planejar medidas de mitigação dos danos nas áreas já consolidadas, mas que se encontram em regiões atingidas pela mancha de inundação. As medidas a serem tomadas devem levar em conta a classe de perigo para cada região, de modo a alocar de maneira mais eficiente os recursos disponíveis.

## 6 CONCLUSÕES

O presente estudo possibilitou avaliar o impacto das inundações e a elaboração de mapas de perigo no município de Vitória de Santo Antão – PE através da delimitação das áreas inundáveis e a extração de parâmetros relevantes para a análise, como a profundidade da água e a velocidade do escoamento.

Os mapas dos indicadores de perigo de inundação se mostraram de grande valia para o planejamento urbano, possibilitando a identificação de áreas não adequadas para o desenvolvimento urbano. Além disso, o presente trabalho conseguiu comprovar a necessidade de se preservar as margens e as planícies de inundação dos rios, visto que o impacto da urbanização é verificado no modelo hidrológico, onde 96,7% do volume precipitado foi transformado em escoamento superficial.

A modelagem hidrológica realizada com o HEC-HMS foi capaz de representar com fidelidade as dinâmicas hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, conclusão comprovada pelo ajuste elevado, com valor de NSE igual a 0,940 em relação aos dados observados.

O bom resultado obtido na modelagem hidrológica pode ser dedicado a qualidade do MDT fornecido pelo PE3D, que permitiu uma excelente caracterização geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, sendo capaz de identificar a rede de drenagem com precisão. Um MDT de resolução menos refinada certamente não seria capaz de produzir resultados tão bons quanto. A alta resolução do MDT utilizado também se mostrou fundamental para a boa qualidade na modelagem hidrodinâmica bidimensional, visto que a topografia do terreno determina a direção e o sentido do escoamento superficial dentro da malha estudada.

A simulação hidrodinâmica bidimensional, por meio do HEC-RAS, conseguiu representar de maneira suficientemente fiel o escoamento do rio Tapacurá no trecho que cruza a sede urbana de Vitória de Santo Antão. O *software* respondeu bem as condições de contorno adotadas, sendo duas externas (a montante e a jusante) e uma condição de contorno interna (contribuição lateral da própria sub-bacia da mancha urbana do município), sem apresentar instabilidades no modelo.

As manchas de inundação obtidas pelas simulações hidrodinâmicas se mostraram coerentes com o histórico de alagamentos na cidade de Vitória de Santo

Antão – PE. O modelo foi capaz de representar de maneira fiel o evento ocorrido em maio de 2011.

A combinação de metodologias para a classificação do perigo de inundação amplamente disponíveis na literatura, dados espaciais de alta resolução, técnicas de SIG e modelagem hidrológica/hidrodinâmica 2D se mostraram de grande valia na elaboração de mapas temáticos que auxiliam na construção de uma valiosa base de dados para organizações de gerenciamento de inundação, planejamento urbano e ambiental.

Todos os dados e ferramentas utilizados, ortofotos, MDT de alta resolução, dados de precipitação e vazão, *softwares* SIG e de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, no presente trabalho são de livre acesso para a população, o que faz da metodologia aqui discutida e apresentada uma ferramenta valiosa e de baixo custo para o entendimento da dinâmica hidrológica de uma determinada região.

O autor espera que esse trabalho possa contribuir na tomada de decisão por parte dos órgãos gestores quanto a adoção de medidas estruturais e/ou não-estruturais para ajudar a diminuir ou, pelo menos, mitigar os danos e prejuízos causados por inundações no município de Vitória de Santo Antão.

O presente trabalho realizou a modelagem hidrológica e hidrodinâmica tendo como entrada dados diários de chuva, desse modo recomenda-se simular eventos de cheia a partir de dados de estações telemétricas que possuam pequeno intervalo de tempo para verificar com mais exatidão a variação temporal da mancha de inundação.

## REFERÊNCIAS

- AFZAL, M.A.; ALI, S.; NAZEER, A.; KHAN, M.I.; WAQAS, M.M.; ASLAM, R.A.; CHEEMA, M.J.M.; NADEEM, M.; SADDIQUE, N.; MUZAMMIL, M.; SHAH, A.N. Flood Inundation Modeling by Integrating HEC–RAS and Satellite Imagery: A Case Study of the Indus River Basin. **Water**, [s.l.], v. 14, n. 19, p. 1-19, 2022
- AL-HUSSEIN, A. A. M.; KHAN, S.; NCIBI, K.; HAMDY, N.; HAMED, Y. Flood analysis using HEC-RAS and HEC-HMS: a case study of Khazir River (Middle East – Northern Iraq). **Water**, [s.l.], v. 14, n. 22, p. 1-19, 2022.
- ALVES, F. H. B. **Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica**. 2017. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ALVES, F. H. B.; CIRILO, J. A.; ASFORA, M. C.; MELO, C. R. Comparativo das precipitações dos eventos extremos de 2010 e 2017 ocorridos na bacia do rio Una em Pernambuco e estimativa dos efeitos de barragem de contenção de cheias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2017. p. 1-8.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, **Portal Hidroweb**, 2023, Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 23 abr. 2023.
- ÁLVARES, J.; FERRER, P.; HOLANDA, D.; JATOBÁ, L. **História da Vitória de Santo Antão, 1983 a 2010**, 1. ed., Vitória de Santo Antão: CEPE, 636p., 2011
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima, **Monitoramento Pluviométrico**, 2023, Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>. Acesso em: 04 jun. 2023.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.
- BATISTA, L. F. D. R.; RIBEIRO NETO, A. Conceptual and analytical framework as flood risk mapping subsidy. **GeoHazards**, [s.l.], v. 3, n. 3, p. 395-411, 2022.
- BATISTA, L. F. D. R.; RIBEIRO NETO, A.; COUTINHO, R. Q. Flood damage analysis: a brazilian case study. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [s.l.], v.14, n.1, p. 150-160, 2020.
- BHUIYAN, M. J. A. N.; DUTTA, D. Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.729-743, dez. 2011.
- BRAGA, R. A. P. **Gestão ambiental da Bacia do Rio Tapacurá: plano de ação**, Recife: Ed, Universitária da Universidade Federal de Pernambuco, 101p., 2001.

BRAGA, S. E.; WANDERLEY, R. A., HOLANDA, T. F. de, CALDAS, A. M. Aplicação da Análise Hierárquica para mapeamento de risco de inundação: O caso no município de Limoeiro (Pernambuco – Brasil), **Meio ambiente**, Brasil, v. 2, n. 1, p. 57-66, 2020.

BRANKENRIDG, G.R.; SYVITSKI, J. P. M.; OVEREEM, I.; HIGGINS, S. A.; KETTNER, A. J.; STEWART-MOORE, J. A.; WESTERHOFF, R. Global mapping of storm surges and the assessment of coastal vulnerability. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 66, n. 3, p. 1295–1312, 2013.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S/A. Curitiba/PR. Disponível em: <[www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf](http://www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf)>. Acesso em: 01 mai. 2023.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; GRISON, F.; MOTA, A. A.; KOBİYAMA, M.; CHAFFE, P. L. B. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 127, p.103-113, 2019.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/EXPRESSÃO GRÁFICA, 2009. 166 p.

CIRILO, J. A.; BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2014a. 627p.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014b.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

DESBORDES, M. **Réflexions sur les methodes de calcul des reseaux urbains d'assainissement pluvial**. 1974. 224 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Engenharia Civil, Université des Sciences e Techniques du Languedoc, Montpellier, França, 1974.

DUARTE, C. C. **Análise dos impactos das mudanças climáticas no escoamento superficial da bacia hidrográfica do Rio Tapacurá – PE, a partir da utilização de um modelo de balanço hídrico mensal semi-distribuído**, 2009, Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009

DUTTA, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. A mathematical model for flood loss estimation. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 277, n. 1-2, p. 24-49, 2003.

ECKHARDT, D.; LEIRAS, A. Systematic literature review of methodologies for assessing the costs of disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s.l.], v. 33, p. 398-416, 2019.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Agropecuária, **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**, Rio de Janeiro: Editora EMBRAPA, 3ª edição, 2013.

EM-DAT. **Disasters in numbers 2022**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023. Disponível em: <<https://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

FONSECA NETO, G. C. da; JUNIOR, M. A. B. da S.; RODRIGUES, A. B.; NETO, A. R.; CABRAL, J. J. da S. P. Modelagem bidimensional para a verificação hidráulica da canalização de um trecho do Rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 2963-2977, 2020.

FONSECA NETO, G. C.; RODRIGUES, A. B.; GOMES, M. M. de A.; JÚNIOR, M. A. B. da S.; CABRAL, J. J. da S. P. Análise de risco em virtude de rompimento hipotético de barragem no semiárido de Pernambuco, *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis, **Anais [...]**, Florianópolis: ABRH, 2017, p. 1-8.

GOMES, M. M. de A.; VERÇOSA, L. F. de M.; CIRILO, J. A. Hydrologic models couples with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 108, p. 3121-3157, 2021.

GÜNERALP, B.; GÜNERALP, I.; LIU, Y. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 31, p. 217-225, 2015.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. **Curve Number Hydrology: State of the Practice**. 2. ed. [s.l.]: ASCE/EWRI, 2009. 106 p.

HOHENTHAL, J.; ALHO, P.; HYYPPA, J.; HYYPPA, H. Laser scanning applications in fluvial studies. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, [s.l.], v. 35, n. 6, p.782-809, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil**, 2021, Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>>, Acesso em: 22 abr. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Cidades**, 2023, Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 22 abr. 2023.

JONOV, C. M. P.; NASCIMENTO, N. O.; SILVA, A. P. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.75-94, 2013.

JORNAL A VERDADE, Periódico de circulação na cidade de Vitória de Santo Antão, Ano 5, edição de nº 41, 2005.

JOSHI, N.; BISTA, A.; POKHREL, I.; KALRA, A.; AHMAD, S. Rainfall-Runoff simulation in Cache river basin, Illinois using HEC-HMS. In: World Environmental and Water Resources Congress 2019: Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management, 2019, Reston – VA – USA, **Anais [...]**, Reston – VA: American Society of Civil Engineers, 2019, p. 1-14.

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

KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS, N.; PEDUZZI, P.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; ARNELL, N.; MACH, K.; MUIR-WOOD, R.; BRAKENRIDGE, G. R.; KRON, W.; BENITO, G.; HONDA, Y.; TAKAHASHI, K.; SHERSTYUKOV, B. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 59, n. 1, p. 1-28, 2014.

KUNDZEWICZ, Z.W. *et al.* **Changes in flood risk in Europe**, 1. ed., Londres, 544p., 2019.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 9, p. 1679-1692, 2009.

MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 110, n. 7, p. 887-904, 1984.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MDR, 2022. Disponível em: <<http://atlasdigital.mdr.gov.br/>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MILLER, J. D., HUTCHINS, M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s.l.], v. 12, [s.n.], p. 345-362, 2017.

MIRANDA, M. R. B. de; BARBOSA NETO, M. V.; MENEZES JÚNIOR, E. M.; GIRÃO, O. Análise do perigo de inundação na bacia hidrográfica do rio Tapacurá – PE. **Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento**, Campinas – SP, v. 1, [s.n.], p. 99-110, 2017.

MOPU Tecnologia Carreteras. **Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos em pequenas cuencas naturales**. Textos de la Direccion General de Carreteras, n. 12, Espanha, 1987, 124 p.

MORAES, T. C.; SANTOS, V. J.; CALIJURI, M. L.; TORRES, F. T. P. Effects on runoff caused by changes in land cover in a Brazilian southeast basin: evaluation by HECHMS and HEC-GEOHMS. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 77, n. 6, p.1-14, 2018.

MOREIRA, A. Á. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Granjeiro- Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2013.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, pp. 885-900, 2007.

NAMARA, W. G.; DAMISSE, T. A.; TUFA, F. G. Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for flood inundation mapping, the case of Awash Bello flood plain, Upper Awash River Basin, Oromiya regional state, Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s.l.], v. 8, p. 1449-1460, 2022.

NASCIMENTO, L. **Arquivos: 2010**. A Voz da Vitória. Vitória de Santo Antão, 2010. Disponível em: <<https://www.avozdavitoria.com/2010/>>. Acesso em: 04 jun. 2023.

NASCIMENTO, L. **Arquivos: 2011**. A Voz da Vitória. Vitória de Santo Antão, 2011. Disponível em: <<https://www.avozdavitoria.com/2011/>>. Acesso em: 04 jun. 2023.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.282-290, 1970.

NEVES, Y. T. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

NOBRE, B. V. B.; FERREIRA, T. S. G.; de OLIVEIRA, O. F.; de ANDRADE, J. M.; de LIMA, E. L. L.; MELO, V. B.; de OLIVEIRA, D. S.; CIRILO, J. A. Oficina de modelagem hidrológica da UFPE: avaliação comparativa de desempenho de diferentes modelos aplicados em bacias hidrográficas do Nordeste. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24., 2021, Belo Horizonte – MG, **Anais [...]**, Belo Horizonte: ABRH, 2021, 10p.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONIO, A. C. D.; SILVA, B. B. da; MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 47, n. 9, p. 1209-1217, 2012.

ONGDAS, N.; AKIYANOVA, F.; KARAKULOV, Y.; MURATBAYEVA, A.; ZINABDIN, N. Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. **Water**, [s.l.], v. 12, n. 10, p. 1-20, 2020.

PEDUZZI, P.; CHATENOUX, B.; DE BONO, A.; HEROLD, C.; KOSSIN, J.; MOUTON, F.; NORDBECK, O. Global trends in tropical cyclone risk. **Nature Climate Change**. [s.l.], v. 2, n. 4, p. 289-294, 2012.

PERNAMBUCO – Governo do estado de Pernambuco – Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). PE3D – Pernambuco Tridimensional, **Mapa**, 2023. Disponível em: < <http://www.pe3d.pe.gov.br/mapa.php>>. Acesso em: 02 de Julho de 2023.

PETZOLD, B.; REISS, P.; STÖSSEL, W. Laser scanning - surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. [s.l.], v. 54, n. 2-3, p.95-104, 1999.

PORTO, R. L. L., 1995, Escoamento Superficial Direto, *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem Urbana**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, vol. 5, Editora da Universidade, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1995, p. 107-165.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519p.

RAZAVI, S.; GOBER, P.; MAIER, H.R.; BROUWER, R.; WHEATER, H. Anthropocene flooding: Challenges for science and society. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 34, n. 8, p. -1996-2000, 2020.

RENSLOW, M. S. **Airborne Topographic LiDAR Manual**. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 2012. 528p.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Metodologias para geração de mapa de indicadores de perigo e áreas inundáveis: município de Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

ROTAVA, J.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V. C. B. Simulação de instabilidade humana em inundações: primeiras considerações. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, **Anais [...]**, Bento Gonçalves: ABRH, 2013, 8p.

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de vazões máximas de projeto por modelos determinísticos e probabilísticos**, 2010, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo – Centro Tecnológico, Vitória, 2010.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de

Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SAVAGE, J.T.S.; BATES, P.; FREER, J.; NEAL, J.; ARONICA, G. When does spatial resolution become spurious in probabilistic flood inundation predictions? **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 30, n. 13, p. 2014-2032, 2016.

SCHAAKE, J. C.; GEYER, J. C.; KNAPP, J. W. Experimental examination of the rational method. **Journal of Hydraulics Divison**. ASCE, v. 93, n. HY6, p. 353-370, 1967.

SCS. **National Engineering Handbook, Section 4**; Soil Conservation Service USDA, Washington, DC, EUA, 1979.

SHAH, Z.; SARASWAT, A.; SAMAL, D. R.; PATEL, D. A single interface for rainfall-runoff simulation and flood assessment – a case of new capability of HEC-RAS for flood assessment and management. **Arabian Journal of Geosciences**, [s.l.], v. 15, n. 18, p. 1-18, 2022.

SHI, W.; WANG, N. An improved SCS-CN Method incorporating slope, soil moisture, and storm duration factors for runoff prediction, **Water**, [s.l.], v. 12, n. 5, p. 1-18, 2020.

SILVA, J. N.; CAIADO, E. da S.; CAIADO, M. A. C. Escolha de parâmetro para interpolação de precipitação diária utilizando o interpolador Inverse Distance Weight (IDW), *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, **Anais [...]**, Bento Gonçalves: ABRH, 2013, 8p.

SILVA, P. M. O; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 258-265, jun. 2008.

SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G.; SANTOS, C. A. G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment, **Natural Hazards**, [s.l.], v. 63, n. 3, p. 576-592, 2012.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 5-29, 2005.

SINGH, S.K.; KANGA, S.; DURIN, B.; KRANJCIC, N.; CHAURASIA, R.; MARKOVINOVIC, D. Flood risk modeling using HEC-RAS and geospatial techniques. **E-ZBORNİK Electronic Collection of Papers of the Faculty of Civil Engineering**, [s.l.], v. 11, n. 22, p. 20-36, 2021.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.423-428, 2002.

TASSEW, B. G.; BELETE, M. A.; MIEGEL, K. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana Basin: the case of Gilgel Abay catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Hydrology**, [s.l.], v. 6, n. 1, 17 p., 2019.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

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

URETA, J. C.; ZURQANI, H. A.; POST, C. J.; URETA, J.; MOTALLEBI, M. Application of nonhydraulic delineation method of flood hazard areas using LiDAR-based data. **Geosciences**, [s.l.], v. 10, n. 9, p. 1-19, 2021.

USACE, **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual**, Version 4.10, United States Army Corps of Engineers – USACE, Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, California, EUA, 2022a, Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.10>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

USACE, **River Analysis System HEC-RAS: HEC-RAS Documentation**, Version 6.3.1, United States Army Corps of Engineers – USACE, Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, California, EUA, 2022b, Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs>>. Acesso em: 05 mai. 2023.

VERÇOSA, L. F. de M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

VIEIRA, L, M, S.; FONTES, A. S.; SIMÕES, A, L, A.; CONCEIÇÃO, M, P, S. Análise da ocorrência de deslizamentos de corpos humanos na planície de inundação a jusante da barragem de Santa Helena – BA decorrente e sua ruptura hipotética. In: Encontro Nacional de Águas Urbanas, 12., 2018, Maceió, **Anais [...]**, Maceió: ABRH, 2018.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital Terrain Modelling, In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. **Geographical Information Systems**, Inglaterra: Longman, p. 269-294, 1991.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**, 2ª Ed., Londres, 469p., 2014.

WRIGHT, J. M. **Floodplain Management: Principles and Current Practices**. Knoxville: The University of Tennessee, 2008.

XAVIER, A. P. C.; SILVA, R. M. Modelagem temporal dinâmica do uso e ocupação do solo baseado em SIG para a bacia do rio Tapacurá (PE), **Revista Geociências**, São Paulo – Brasil, v. 37, n. 1, p. 193-210, 2018.

YALCIN, E. Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 101, p. 995-1017, 2020.