



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

LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA APLICADA À AVALIAÇÃO
DA OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES NA CIDADE DE RECIFE, PE**

Recife
2019

LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA APLICADA À AVALIAÇÃO
DA OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES NA CIDADE DE RECIFE, PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências 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

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- V482m Verçosa, Livia Fragoso de Melo.
Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE / Livia Fragoso de Melo Verçosa. - 2019.
114 folhas, il., tab., abr. e sigl.
- Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui referências e apêndice.
1. Engenharia Civil. 2. Modelagem hidrodinâmica bidimensional. 3. PE3D.
4. LiDAR. 5. Controle de inundações. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-8

LÍVIA FRAGOSO DE MELO VERÇOSA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA APLICADA À AVALIAÇÃO
DA OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES NA CIDADE DE RECIFE, PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Aprovada em: 23/08/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Tereza e Yvan, por sempre priorizarem meus estudos e por terem me ensinado o valor do conhecimento. Seu carinho, apoio e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica foram fundamentais para minhas conquistas.

À Alexandre Vianna pelo amor, companheirismo e compreensão, seus conselhos e otimismo foram essenciais para que eu me mantivesse tranquila e confiante ao longo do mestrado.

Ao meu querido orientador, prof. Almir Cirilo, por me orientar com sabedoria e entusiasmo, pela paciência, ensinamentos, confiança depositada e maravilhoso convívio no decorrer deste trabalho.

Às minhas amigas de longas datas, Amora, Diandra, Karol, Marcella e Priscilla, pela amizade, alegria e descontração, e também por compreenderem a minha ausência em alguns momentos.

Aos amigos que fiz no mestrado, especialmente Mayara, pela cumplicidade e parceria, trazendo mais leveza, tranquilidade e diversão ao mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

A todos aqueles que, de alguma maneira, doaram um pouco de si para que a conclusão desse trabalho fosse possível.

RESUMO

As projeções de mudanças climáticas e expansão das cidades costeiras apontam para um provável aumento da exposição de pessoas e infraestrutura às inundações urbanas. Nesse contexto inclui-se a cidade do Recife, a qual possui peculiaridades geográficas e urbanísticas que a tornam altamente suscetível a inundações. O presente trabalho buscou avaliar a ocorrência de inundações no Recife decorrentes dos processos de cheia no rio Capibaribe, considerando eventos extremos e cenários de aumento do nível médio do mar. Para isso, foram avaliados os eventos de 1975 e 2011, considerando dois cenários: existência e ausência do sistema de contenção de cheias da bacia do rio Capibaribe. Para avaliação do aumento médio do nível dos mares, foram utilizadas as projeções estabelecidas pelo IPCC. Os *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS foram utilizados para a realização da modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional, respectivamente. Para a caracterização do uso e ocupação do solo e da geomorfologia da área de estudo, foram utilizados os produtos do levantamento do terreno a laser que compõem o projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). As simulações conseguiram reproduzir as cheias de 1975 e de 2011, permitindo definir a extensão da inundação. Os resultados mostraram uma redução de 82% e 57% na área inundada pelas cheias de 1975 e 2011, respectivamente, no cenário de existência das barragens, observando-se que o evento de 2011 provocaria impactos similares aos ocorridos em 1975 não fosse a contenção pelo sistema de barragens. Já as simulações da elevação do nível dos mares indicam um acréscimo da área inundada em eventos similares.

Palavras-chave: Modelagem hidrodinâmica bidimensional. PE3D. LiDAR. Controle de inundações.

ABSTRACT

Projections of climate change and expansion of coastal cities point to a likely increase in exposure of people and infrastructure to urban flooding. In this context, it is included the city of Recife, which has geographical and urban peculiarities that make it highly susceptible to flooding. The present work aimed to evaluate the occurrence of flooding in Recife due to flooding processes in the Capibaribe river, considering extreme events and scenarios of sea-level rise. For this, the events of 1975 and 2011 were evaluated, considering two scenarios: existence and absence of the flood containment system of the Capibaribe river basin. To assess the average sea-level rise, the projections established by the IPCC were used. The HEC-HMS and HEC-RAS software were used for hydrological and two-dimensional hydrodynamic modeling, respectively. For the characterization of the soil use and occupation and the geomorphology of the study area, the laser terrain survey products that make up the Pernambuco Tridimensional (PE3D) project were used. The simulations were able to reproduce the floods of 1975 and 2011, allowing to define the flood extension. The results show a reduction of 82% and 57% in the flooded area of 1975 and 2011 events, respectively, in the scenario of the existence of the dams, noticing that the 2011 event would have similar impacts to those occurred in 1975 if it were not for the dam system containment. The simulations of sea-level rise indicate an increase of the flooded area in similar events.

Keywords: Two-dimensional hydrodynamic modeling. PE3D. LiDAR. Flood control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Principais danos decorrentes das inundações urbanas.....	18
Figura 1 - Quantidade de registros globais de inundações entre 1950 e 2010.....	19
Figura 2 - Panorama dos desastres naturais em 2018.....	20
Quadro 2 - Descrição dos cenários climáticos RCPs.....	23
Quadro 3 - Resumo das características dos modelos de escoamento.....	30
Figura 3 - Divisão dos blocos e quadrículas do mapeamento do PE3D.....	35
Figura 4 - Mapa da localização da área de estudo.....	38
Figura 5 - Mapa da localização da bacia do rio Capibaribe.....	39
Figura 6 - Municípios com sede dentro da bacia do rio Capibaribe.....	41
Figura 7 - Incursão da maré sobre o Recife.....	47
Figura 8 - Precipitação total anual no Recife.....	48
Figura 9 - Médias mensais de precipitação no Recife.....	48
Figura 10 - Estuário comum do Recife.....	51
Quadro 4 - Canais que compõem a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	52
Figura 11 - Localização das estações hidrológicas utilizadas.....	56
Figura 12 - Sub-bacias dos canais e riachos integrantes da bacia do Capibaribe.....	58

Figura 13 - Mapa de classificação de uso e ocupação do solo da área de estudo.....	63
Figura 14 - Detalhes da classificação do uso do solo sobre ortofoto do PE3D.....	63
Figura 15 - Exemplo esquemático da correlação dos níveis no Porto do Recife.....	66
Figura 16 - Hidrograma unitário retangular do SCS.....	71
Figura 17 - Localização da malha de simulação 2D sobre MDT da área de estudo.....	76
Figura 18 - Detalhes da malha de células utilizada na simulação hidrodinâmica...	77
Figura 19 - Bairro do Arruda inundado pela cheia de 1975.....	78
Figura 20 - Bairro Ilha do Retiro inundado pela cheia de 1975.....	79
Figura 21 - Registro da precipitação durante o período crítico da enchente.....	80
Figura 22 - Maregrama dos dias 17/07/1975 e 18/07/1975 no Porto do Recife.....	81
Figura 23 - Sistema de contenção de cheia da bacia do Capibaribe.....	82
Figura 24 - Registro da precipitação no dia 05/05/2011 na estação PEA301.....	83
Figura 25 - Registro da precipitação no dia 05/05/2011 na estação 32568.....	83
Figura 26 - Maregrama do dia 05/05/2011 no Porto do Recife.....	84
Figura 27 - Vila Miguel Arraes inundada pela cheia de 2011.....	85
Figura 28 - Alagamentos decorrentes da cheia de 2011: (A) bairro de Casa Forte; (B) bairro do Cordeiro.....	85
Figura 29 - Mapa da mancha de inundação no Recife, cheia de 1975 sem barragens.....	87

Figura 30 - Detalhes dos níveis da inundação estimados para Ilha do Retiro.....	88
Figura 31 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 1975 com barragens.....	91
Figura 32 - Sobreposição das manchas de inundação da cheia de 1975 com e sem barragens.....	92
Figura 33 - Sobreposição das manchas de inundação do cenário base e projeção 2.....	94
Figura 34 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 2011 sem barragens.....	96
Figura 35 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 2011 com barragens.....	98
Figura 36 - Sobreposição das manchas de inundação da cheia de 2011 com e sem barragens.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Estimativa do aumento médio do nível global dos mares.....	26
Tabela 2 -	Descrição dos termos da equação dinâmica.....	29
Tabela 3 -	Informações técnicas dos produtos do PE3D.....	34
Tabela 4 -	Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	40
Tabela 5 -	Normais climatológicas para o período de 1989 a 2010 na estação Recife-Curado.....	49
Tabela 6 -	Relação das estações hidrológicas utilizadas.....	55
Tabela 7 -	Principais características das bacias contribuintes do rio Capibaribe.....	60
Tabela 8 -	Percentual das áreas de cada classe por bacia hidrográfica.....	62
Tabela 9 -	Valores médios dos parâmetros CN para diferentes tipos de ocupação urbana.....	69
Tabela 10 -	Valores de CN estimados para as bacias contribuintes do rio Capibaribe.....	70
Tabela 11 -	Área das manchas de inundação para as projeções de aumento do NMM.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CN	Curve Number
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EM-DAT	Emergency Events Database
GEE	Gases do Efeito Estufa
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital de Terreno
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
SRHE-PE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco
UP	Unidade de Planejamento Hídrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.1.1	Objetivos específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS.....	17
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	22
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA.....	27
2.4	DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE	37
3.1.1	Localização e generalidades	38
3.1.2	Hidrografia	41
3.1.3	Clima.....	42
3.2	ASPECTOS FISIOGRÁFICOS DA CIDADE DE RECIFE.....	43
3.2.1	Características gerais	44
3.2.2	Geologia e relevo.....	45
3.2.3	Clima.....	47
3.2.4	Rede de macrodrenagem.....	50
3.3	AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	54
3.3.1	Dados topográficos	54
3.3.2	Dados hidrológicos	54
3.3.3	Definição da rede de drenagem e bacias contribuintes.....	56
3.3.4	Classificação do uso e ocupação do solo.....	61

3.3.5	Marés	64
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA	67
3.4.1	Métodos para simulação do processo chuva-vazão	68
3.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	73
3.6	EVENTOS SIMULADOS	77
3.6.1	Enchente de 1975	77
3.6.2	Enchente de 2011	81
4	RESULTADOS	86
4.1	ENCHENTE DE 1975	86
4.2	ENCHENTE DE 2011	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – ALGORITMO INTERPOLAÇÃO DE MARÉ	113

1 INTRODUÇÃO

A urbanização desordenada com elevados índices de crescimento demográfico produz grandes impactos na infraestrutura urbana, principalmente naquela que está relacionada com os recursos hídricos, tais como os sistemas de abastecimento de água, os sistemas de esgotamento sanitário e os sistemas de drenagem urbana. Como resultado, tem-se a sobrecarga desses sistemas, trazendo diversos prejuízos socioeconômicos para a sociedade.

Um dos impactos mais significativos desse processo é o aumento da frequência e magnitude das inundações nas bacias urbanas, as quais possuem elevados índices de impermeabilização do solo (JACOBSON, 2011), de modo a gerar uma vazão de escoamento superficial por vezes superior à capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem urbana.

Em nível global, as inundações representam a tipologia de desastre natural mais frequente (EM-DAT, 2019) e a tendência é que mais pessoas estejam expostas à esse fenômeno, visto que as projeções de expansão dos centros urbanos apontam para um aumento da ocupação de áreas inundáveis nos próximos anos (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015). Tal situação é agravada quando consideradas as projeções e os efeitos das mudanças climáticas sobre os regimes climatológico e hidrológico.

De acordo com o 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC*), num cenário mundial, os riscos climáticos, baseados em precipitações extremas e inundações costeiras, já são de moderado a alto, apresentando um alto índice de confiança na incerteza das previsões (IPCC, 2015).

As projeções são ainda mais preocupantes para cidades costeiras devido às estimativas de elevação do nível dos mares. Blankspoor, Dasgupta e Laplante (2014) avaliaram o impacto do aumento de 1,00 m do nível dos mares em 86 países em desenvolvimento e constataram que, em média, 68% das regiões costeiras desses países apresentam risco de inundação nesse cenário.

Nesse contexto inclui-se a cidade do Recife, a qual possui peculiaridades geográficas e urbanísticas que a tornam altamente suscetível a inundações. As baixas cotas de seu território em relação ao nível do mar, elevada pluviosidade, baixo gradiente hidráulico, lençol freático elevado, influência das marés e a alta taxa de impermeabilização do solo concorrem para que alagamentos e inundações sejam recorrentes.

Diante da expectativa de aumento da exposição de pessoas e infraestrutura às inundações urbanas, é necessária uma melhor compreensão do comportamento da macrodrenagem do Recife perante a eventos extremos a fim de auxiliar na preparação da cidade para os desafios futuros, fornecendo informações relevantes aos órgãos gestores para o desenvolvimento de estratégias e medidas adaptativas.

Os processos hidrológicos em ambientes urbanos são bastante complexos, de modo que a aplicação da modelagem hidrológica e hidrodinâmica é uma etapa essencial nos estudos de drenagem urbana, tendo se consagrado como uma importante ferramenta de gestão das águas pluviais. Tradicionalmente, as cotas de inundação bem como a velocidade do escoamento são estimadas por meio de modelos hidrodinâmicos unidimensionais (PAPAIOANNOU *et al.*, 2016). No entanto, em redes complexas de rios e canais, como é o caso da rede de drenagem do Recife, os modelos unidimensionais podem não ser os mais apropriados para representar o escoamento devido à simplificação de que o escoamento segue apenas na direção longitudinal do curso d'água (PINOS; TIMBE, 2019).

Dentro desse contexto, o presente trabalho visa, por meio da aplicação da modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional, contribuir com a gestão das águas pluviais urbanas do Recife, fornecendo informações que permitam um melhor entendimento do processo de formação das inundações na cidade, particularmente durante processos de cheias ocorridas no rio Capibaribe.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar a ocorrência de inundações no Recife decorrentes dos processos de cheia no rio Capibaribe, considerando eventos extremos e cenários de aumento do nível médio dos mares.

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar a simulação hidrodinâmica bidimensional dos eventos de cheias dos anos de 1975 e 2011 para avaliação da influência do sistema de contenção de cheia da bacia do rio Capibaribe na proteção do Recife;
- Simular cenários de aumento do nível dos mares para avaliação da resposta hidrodinâmica do sistema de drenagem do Recife.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2.1 INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS

Inundação é um fenômeno natural decorrente de precipitações extremas que acabam gerando um volume de água superior à capacidade de escoamento do leito principal do curso d'água, provocando o extravasamento das águas para o leito maior.

Conforme as cidades se desenvolvem, ocorrem mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo, acarretando alterações nos processos hidrológicos, tais como redução da infiltração da água no solo, aumento do escoamento superficial e antecipação da vazão de pico. Esse processo aliado à ocupação de áreas impróprias, como as várzeas dos rios, acaba produzindo inundações no meio urbano, cujos danos são mais significativos do que nas áreas rurais, visto que os assentamentos urbanos contêm os principais atributos socioeconômicos e bases de ativos de qualquer população nacional. O Quadro 1 apresenta os principais danos decorrentes das inundações urbanas.

Quadro 1 – Principais danos decorrentes das inundações urbanas.

Danos Tangíveis	
Danos Diretos	Danos Indiretos
Danos físicos aos domicílios. Danos físicos ao comércio e serviços. Danos físicos aos equipamentos e plantas industriais. Danos físicos à infraestrutura.	Custos de limpeza, alojamento e medicamentos. Perda de renda. Lucros cessantes, perda de informações e bases de dados. Interrupção da produção, perda de produção e de receita. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados. Perturbação, paralisações e congestionamento nos serviços, custos adicionais de transporte, efeitos multiplicadores dos danos sobre outras áreas.
Danos Intangíveis	
Danos Diretos	Danos Indiretos
Ferimento e perda de vida humana. Disseminação de doenças. Perda de objetos de valor sentimental. Perda de patrimônio histórico e cultural. Perda de animais de estimação.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade. Danos de longo prazo à saúde. Inconvenientes de interrupção e perturbações nas atividades econômicas, meios de transporte e comunicação. Perturbação no cotidiano da população.

Fonte: Jonov, Nascimento e Silva (2013)

Para Tucci (2005a), o escoamento superficial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas através dos processos de inundação das áreas ribeirinhas e inundação decorrente da urbanização em si.

As inundações ribeirinhas são consequências da combinação da ocorrência de precipitações intensas ou contínuas com a ocupação indevida do leito maior dos cursos d'água. As inundações urbanas, por sua vez, são consequências do aumento da impermeabilização do solo, da canalização dos cursos d'água e da redução da seção de escoamento, os quais provocam o aumento na magnitude e frequência da vazão de pico, levando a inundações e transtornos que originalmente não ocorriam ou potencializando as existentes.

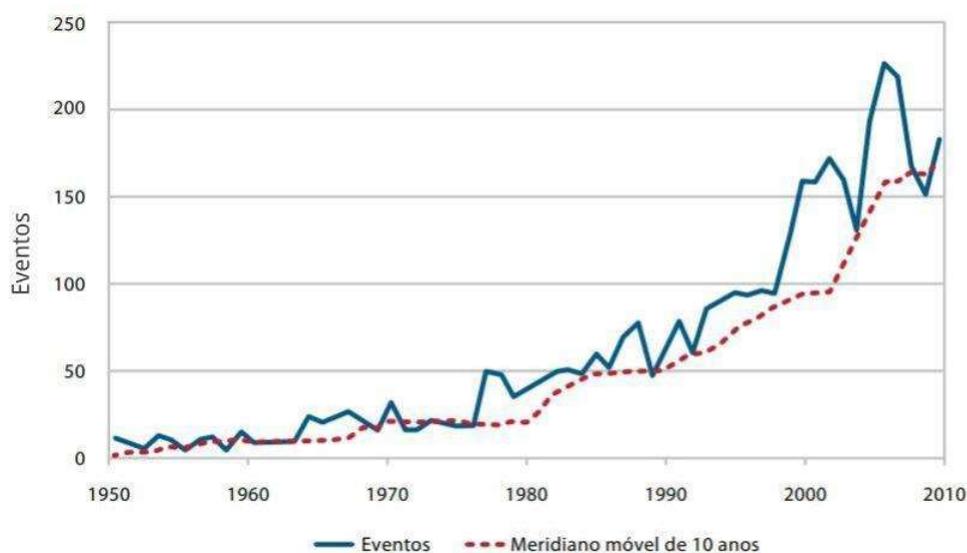
Miller *et al.* (2014), ao analisarem o impacto hidrológico do processo de urbanização em uma bacia hidrográfica na Inglaterra, cuja área impermeável passou

de 11% em 1960 para 44% em 2010, observaram um aumento de mais de 400% na vazão de pico e uma redução de 51% no tempo de subida do hidrograma, comprovando a maior susceptibilidade das bacias urbanas a inundações.

As bacias urbanizadas também apresentam, ao longo dos anos, mudanças hidrológicas mais significativas do que as bacias minimamente alteradas, como pode ser visto no estudo de Hodgkins *et al.* (2019). Nesse estudo, foram avaliadas as mudanças nas vazões de pico anuais em diversas bacias nos Estados Unidos. Entre 1941 e 2015, foi observado um aumento mediano de 8% na vazão de pico das bacias minimamente alteradas, enquanto que o aumento nas bacias urbanizadas foi de 22%.

Segundo Jha, Bloch e Lamond (2012), a ocorrência de inundações é o evento mais frequente entre todos os desastres naturais e tem aumentado significativamente nos últimos anos, como pode ser visto na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Quantidade de registros globais de inundações entre 1950 e 2010.



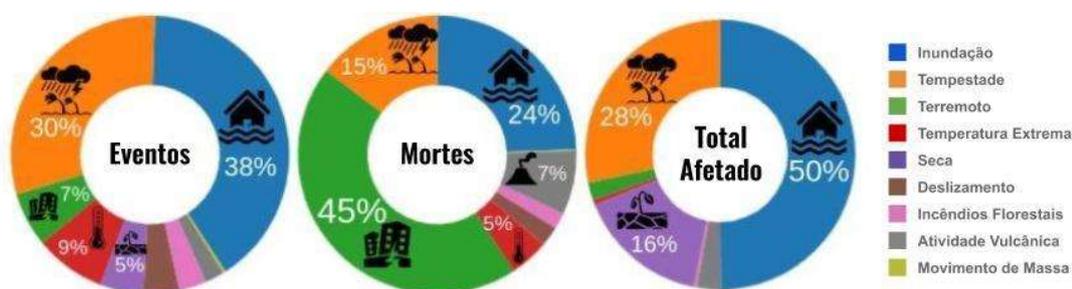
Fonte: Jha, Bloch e Lamond (2012)

Em 1988, o Centro de Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED) lançou o Banco de Dados de Eventos de Emergência (Emergency Events Database EM-DAT), plataforma que

reúne dados globais acerca da ocorrência e efeitos de desastres naturais desde 1900 até os dias atuais.

De acordo com o último relatório do EM-DAT, de 2000 a 2018, as inundações afetaram mais pessoas do que qualquer outro tipo de desastre (EM-DAT, 2019). Só em 2018, mais de 34 milhões de pessoas no mundo todo foram afetadas por inundações, resultando em mais de 2.800 óbitos reportados (EM-DAT,2019). Um panorama mundial dos desastres naturais em 2018 pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Panorama dos desastres naturais em 2018.



Fonte: EM-DAT (2019)

No contexto nacional, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013) apresenta um panorama dos desastres naturais ocorridos entre 1991 e 2012. Inundações, as quais incluem as inundações gradativas e inundações bruscas (enxurradas), constituem a segunda tipologia de desastre natural mais recorrente no Brasil. Nesse período, esses eventos afetaram mais de 41 milhões de pessoas, ocupando o segundo lugar na categoria de desastre que mais afeta a população brasileira, perdendo apenas para a seca/estiagem. Em relação ao número de óbitos decorrentes de desastres naturais, a inundação foi o desastre que mais causou morte, contabilizando 71,55% do total registrado.

Ainda segundo o Atlas (UFSC, 2013), os estados do litoral brasileiro apresentaram a maior concentração de inundações bruscas, com destaque para Pernambuco, Alagoas, Espírito Santo, Rio de Janeiro e Santa Catarina.

O estado de Pernambuco possui 427 registros oficiais de inundações bruscas severas, as quais afetaram mais de 1,8 milhões de pessoas, levando à 127

falecimentos registrados ao longo desses 22 anos avaliados pelo Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013). Dos 185 municípios pernambucanos, 85% foram atingidos pelas inundações bruscas, com ênfase para a capital, Recife, e para o município de Camaragibe, que apresentaram a maior frequência, com 13 registros cada.

Já para inundações gradativas excepcionais, o estado de Pernambuco possui 59 registros oficiais de eventos, os quais afetaram mais de 100 mil pessoas, sendo registrados oficialmente 6 mortes nesses 22 anos. Os municípios mais atingidos por inundações extremas recorrentes foram: Recife, Jaboatão dos Guararapes e Olinda, situadas na mesorregião Metropolitana de Recife, e Verdejante, no Sertão Pernambucano.

As inundações, em geral, ocupam o segundo lugar na categoria de desastres naturais que mais ocorrem em Pernambuco, correspondendo à cerca de 26% dos registros totais. Entretanto, quando avaliada a distribuição espacial dos desastres, observa-se que as inundações constituem o desastre mais frequente nas mesorregiões Mata pernambucana e Metropolitana do Recife, com destaque para o município do Recife, o qual foi o mais afetado pelas inundações entre 1991 e 2012, totalizando 16 registros. O histórico de inundações acometidas na cidade do Recife pode ser consultado em Alcoforado (2006) e em Alves (2017).

Nas últimas décadas, as áreas urbanas têm se expandido rapidamente (ANGEL *et al.*, 2011), de modo que as projeções indicam que 60% da população mundial, cerca de 5 bilhões de pessoas, viverá em centros urbanos em 2030 (SETO; GÜNERALP; HUTYRA, 2012). Além disso, projeções indicam que, para esse mesmo período, 40% da área urbana global deverá estar localizada em zonas com alta frequência de inundações (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015). No geral, sem considerar os possíveis impactos das mudanças climáticas, a extensão das áreas urbanas expostas a inundações aumentará 2,7 vezes até 2030 (GÜNERALP; GÜNERALP; LIU, 2015).

Considerando a tendência de aumento da frequência das inundações e de crescimento das áreas urbanas, espera-se que as inundações urbanas sejam mais danosas e mais onerosas de gerenciar devido à maior exposição de pessoas,

infraestrutura e ativos, se tornando um desafio ainda maior a ser enfrentado nos próximos anos.

Jongman, Ward e Aerts (2012) estimaram, sem considerar as mudanças climáticas, que a exposição econômica global a inundações costeiras e fluviais pode ser de 80 trilhões de dólares em 2050, quando cogitado o aumento das áreas urbanas em zonas de inundação, e de 158 trilhões de dólares, quando cogitadas as projeções populacionais das zonas de inundação.

As ameaças de aumento da exposição e da vulnerabilidade das áreas urbanas e todo seu aparato às inundações são ainda maiores quando considerados os efeitos das mudanças climáticas sobre os regimes climatológico e hidrológico.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O termo mudanças climáticas refere-se às alterações nos padrões climáticos, as quais podem ser identificadas através da variabilidade persistente das propriedades climáticas por longos períodos (IPCC, 2007).

Esse fenômeno tem sido objeto de diversas pesquisas devido aos seus efeitos, dentre os quais se destacam o aumento da temperatura global e dos oceanos, o aumento do nível dos mares e aumento da frequência de eventos climáticos e hidrológicos extremos (TRENBERTH, 2011; IPCC, 2013; PBMC, 2016).

Uma ampla variedade de processos naturais pode afetar radicalmente o clima. No entanto, existe um consenso entre diversos pesquisadores de que as mudanças antropogênicas na composição da atmosfera são a principal causa das mudanças climáticas (COOK *et al.*, 2016).

De acordo com o 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC*), o aumento das emissões antropogênicas dos gases do efeito estufa (GEE), principalmente emissão de CO₂, é a principal causa do aumento da temperatura média da superfície global (IPCC, 2015).

A relação entre emissão antropogênica do CO₂ e mudanças na temperatura atmosférica, na precipitação e no nível dos mares foi abordada por Solomon *et al.* (2009), os quais concluíram que as mudanças climáticas já estão ocorrendo e mesmo que as emissões fossem cessadas as mudanças ainda continuariam por mais 1.000 anos devido à longevidade do CO₂ atmosférico.

A quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – CMIP5*) apresenta novos modelos climáticos globais com uma representação mais completa do sistema climático e com incorporação de projeções climáticas mais atuais. O CMIP5 compreende 20 grupos de modelagem climática do mundo todo destinados a realizar um conjunto de simulações climáticas que se concentram em grandes lacunas na compreensão das mudanças climáticas passadas e futuras (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012).

As projeções climáticas, denominadas Caminhos Representativos de Concentração (*Representative Concentration Pathways - RCP*), descrevem quatro diferentes cenários para o fim do século XXI, com base em projeções de emissões e concentrações atmosféricas de GEE e aerossóis. Os RCPs estão classificados em função da forçante radiativa (w/m^2) e recebem o nome correspondente à estimativa do seu nível em 2100, os quais são baseados na forçante radiativa dos GEE (VAN VUUREN *et al.*, 2011). O Quadro 2 apresenta a descrição de cada cenário.

Quadro 2 - Descrição dos cenários climáticos RCPs.

Cenário	Descrição
RCP8.5	Cenário de alta emissão de GEE, no qual a forçante radiativa atinge $8,5 \text{ w m}^{-1}$ ($\sim 1370 \text{ ppm}$ de CO ₂) em 2100.
RCP6	Cenário de emissão intermediária de GEE, no qual a forçante radiativa se estabiliza em valores próximos de $6,0 \text{ w m}^{-1}$ ($\sim 850 \text{ ppm}$ de CO ₂) após 2100.
RCP4.5	Cenário de emissão intermediária de GEE, no qual a forçante radiativa se estabiliza em valores próximos de $4,5 \text{ w m}^{-1}$ ($\sim 650 \text{ ppm}$ de CO ₂) após 2100.
RCP2.6	Cenário de mitigação rigorosa da emissão de GEE, no qual a forçante radiativa atinge um pico de 3 w m^{-1} ($\sim 490 \text{ ppm}$ de CO ₂) antes de 2100 e então decai para valores em torno de $2,6 \text{ w m}^{-1}$ em 2100.

Fonte: VAN VUUREN *et al.* (2011)

Estudos mostram que, se as emissões de GEE continuarem aumentando no atual ritmo, mudanças severas ocorrerão ao fim do século 21. De acordo com o IPCC (2013), o aumento da temperatura da superfície global pode ser de até 4,8°C em relação à 1986-2005, sob o cenário mais alarmante (RCP8.5).

Kharin *et al.* (2013), considerando a projeção RCP8.5, estimaram um aumento médio global de 30% na magnitude das precipitações com tempo de retorno de 20 anos, determinados com relação ao período de 1986-2005, e uma redução do tempo de retorno para 6 anos ao fim do século 21.

Rajczak e Schär (2017) projetaram as precipitações sobre a Europa para o período de 2070-2099 nos cenários RCPs, e seus resultados também indicaram um aumento na magnitude de eventos extremos, o qual ultrapassou 20% no cenário mais alarmante, considerando uma precipitação com tempo de retorno de 50 anos relativo à 1989-2010. As simulações também apontaram uma redução do total precipitado durante o verão, sugerindo a possibilidade de aumento do período seco.

Alexander e Arblaster (2017) analisaram o comportamento de índices de extremos de temperatura e precipitação nas projeções RCP4.5 e RCP8.5 para a Austrália. Um aumento de mais de 4°C acima do atual nas temperaturas máxima e mínima foi verificado sob o cenário RCP8.5, assim como um aumento do número dias quentes e redução do número de dias frios. Em termos de precipitação, o estudo apontou um aumento das precipitações intensas e aumento do número de dias secos consecutivos, também sugerindo uma intensificação das secas na Austrália.

Apesar de haver uma tendência global de aumento de eventos extremos, as mudanças projetadas não serão uniformemente distribuídas, por exemplo, estima-se aumento da estação chuvosa em certas regiões, enquanto que em outras espera-se prolongação da estação seca.

A distribuição regional das mudanças nos índices de extremo de temperatura e precipitação sob os cenários RCPs pode ser verificada no estudo de Sillmann *et al.* (2013). Nele, os países dispostos nas altas latitudes do hemisfério Norte apresentaram o maior aquecimento. Na região Amazônica e no Mediterrâneo foram observados os maiores aumentos no número de dias secos consecutivos, indicando maior duração dos períodos de seca. No entanto, também foi observado nessas

regiões o aumento no índice de dias muito úmidos, sugerindo que a precipitação pode ser muito mais extrema quando ocorrer. As regiões Sul e Sudeste da Ásia apresentaram o maior aumento das precipitações extremas, cerca de 30%, além de uma intensificação em ambas as estações secas e chuvosas.

Diante das projeções de aumento da magnitude e frequência de precipitações extremas, espera-se também um aumento do risco de inundação, principalmente nas regiões onde também são estimadas a prolongação da estação chuvosa.

Hirabayashi *et al.* (2013) modelaram, considerando apenas os cenários de mudanças climáticas definidos pelo CMIP5, as vazões de descarga de 29 bacias espalhadas pelo mundo. Em cerca de 72% das bacias avaliadas, prevê-se que descargas com tempo de retorno de 100 anos para o século 20 passem a ocorrer a cada 10-50 anos no século 21, indicando o aumento da frequência de inundações.

Arnell e Gosling (2014) investigaram o comportamento da vazão de tempo de retorno atual de 100 anos, em diversos cenários globais de mudanças climáticas, para o ano de 2050. Em suas estimativas, o risco global de inundação aumentaria em 187%, em comparação com o cenário de ausência de mudanças climáticas.

Alfieri *et al.* (2015) avaliaram as mudanças na frequência da vazão com tempo de retorno atual de 100 anos para a Europa sob o cenário RCP8.5 e verificaram que, em média, esse evento deve dobrar de frequência dentro de três décadas, mesmo nas regiões onde se espera uma redução da vazão média.

As previsões são ainda mais alarmantes para as cidades localizadas em planícies costeiras, as quais são áreas naturalmente propensas a inundações, cujo risco tende a aumentar significativamente com as estimativas de elevação do nível dos mares. Além disso, a elevada taxa de crescimento das populações urbanas costeiras aponta para um aumento significativo dos danos decorrentes das inundações (SETO, 2011).

A elevação do nível dos mares é considerada um dos impactos mais concretos decorrentes das mudanças climáticas, com efeitos que incluem a inundação permanente de áreas costeiras de baixa altitude, extensão da mancha da inundação sobre o interior das planícies costeiras, maior duração da inundação e intrusão salina

das águas subterrâneas (NICHOLLS; CAZANAVE, 2010; HU; DESER, 2013; YIN *et al.*, 2017; BARNARD *et al.*, 2019).

Registros de maré têm mostrado que o nível médio global dos oceanos tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1,8 cm/década ao longo do século 20 (CHURCH; WHITE, 2011) e, nas décadas recentes, esse aumento acelerou para aproximadamente 3,1 cm/década (CHURCH *et al.*, 2011). Como consequência do aquecimento global dos oceanos devido à crescente emissão de GEE, estima-se que o nível do mar possa aumentar em até 82 cm ao fim do século 21 na projeção RCP8.5 (IPCC, 2013). As demais previsões de aumento do nível médio global dos mares sob as projeções RCPs estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa do aumento médio do nível global dos mares.

Cenários	Período 2046-2065		Período 2081-2100	
	Variação provável (m)	Média (m)	Variação provável (m)	Média (m)
RCP2.6	0,17-0,32	0,24	0,26-0,55	0,4
RCP4.5	0,19-0,33	0,26	0,32-0,63	0,47
RCP6.0	0,18-0,32	0,25	0,33-0,63	0,48
RCP8.5	0,22-0,38	0,3	0,45-0,82	0,63

Fonte: IPCC (2013)

Hanson *et al.* (2010) avaliaram a exposição de 136 grandes cidades portuárias a inundações, considerando uma cheia com tempo de retorno atual de 100 anos, um aumento global do nível dos mares de 0,5 m acima do nível atual, crescimento populacional e subsidência do solo. Como resultado, estima-se, para a década de 2070, que a população total exposta seja quase quatro vezes maior que a atual, compreendendo cerca de 150 milhões de pessoas.

Se nenhuma medida for tomada, prevê-se que entre 0,2 e 4,6% da população global seja anualmente exposta a inundações em 2100, sob as projeções de aumento do nível do mar associadas às RCPs, acarretando perdas anuais esperadas de 0,3–9,3% do produto interno bruto global (HINKEL *et al.*, 2014).

As alterações aqui abordadas têm impacto substancial sobre a infraestrutura urbana, ecossistemas, economia e saúde pública, sendo urgente um aprofundamento

dos estudos a nível local para possibilitar a elaboração de medidas mitigadoras e de estratégias adaptativas efetivas.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

Modelos são representações de um sistema ou fenômeno real, em uma forma mais simplificada, com o objetivo de facilitar a compreensão de seus componentes, suas características, seu comportamento e suas respostas a diversas condições.

Na engenharia de recursos hídricos, os modelos hidrológicos surgem como ferramentas que permitem um melhor entendimento dos processos hidrológicos atuantes na bacia hidrográfica, suas interações e suas respostas a diferentes ações, tais como precipitações extremas, modificações do uso e ocupação do solo, estiagens, etc.

Comumente, a modelagem hidrológica é aplicada na avaliação do impacto da urbanização sobre o escoamento superficial (SURIYA; MUDGAL, 2012). Benini e Mendiondo (2015) realizaram simulações hidrológicas de vários cenários de ocupação urbana com o intuito de identificar qual o cenário produziria o menor impacto no escoamento superficial. O estudo permitiu uma melhor compreensão do processo de urbanização da bacia e também o planejamento da expansão urbana com vistas à redução do risco de inundação.

Kaiser (2006) comenta que os modelos hidrológicos podem ser utilizados para diversas finalidades, como estender séries de dados fluviométricos na elaboração de projetos de engenharia, simular vazões em cursos de 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, ou ainda simular fases do ciclo hidrológico a fim de subsidiar estudos específicos.

Os modelos hidrodinâmicos, por sua vez, buscam descrever o comportamento e o movimento da água na rede de drenagem, possibilitando simular a velocidade de escoamento, a altura da lâmina de água no canal, as cotas e extensão da planície de inundação.

Os escoamentos em superfície livre podem ser classificados em regime permanente e não-permanente. Quando o gradiente da velocidade e do nível não varia em relação ao tempo, o regime de escoamento é denominado permanente. A rigor, essa condição não representa os escoamentos superficiais na natureza, pois as variáveis de estado sempre oscilam, mesmo que de forma imperceptível e lenta. Já os escoamentos em regime não-permanente ocorrem quando há variação no tempo e no espaço das variáveis que os descrevem.

Os escoamentos não-permanente em canais e rios são regidos pelo princípio da conservação de massa e quantidade de movimento, e podem ser representados em uma ou mais dimensões espaciais.

De acordo com o princípio da conservação de massa, em um volume de controle representado pelo trecho de rio entre duas seções, a diferença entre os volumes afluente e efluente do trecho, num determinado intervalo de tempo, corresponde ao volume armazenado no trecho no mesmo intervalo. Esse processo é representado pela equação da continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

onde Q é a vazão em m^3/s ; A é a área da seção molhada em m^2 ; x é a distância no sentido longitudinal em m ; t é o tempo em s ; e q é a vazão por unidade de largura de contribuição lateral em $\text{m}^3/\text{s.m}$.

O princípio da conservação da quantidade de movimento estabelece que a variação temporal da quantidade de movimento de um sistema é igual à soma das forças atuantes sobre o sistema. Considerando o escoamento em um rio, as principais forças atuantes sobre a massa de água em um volume de controle são a componente da força gravitacional no sentido do escoamento, a força de atrito junto às margens e ao fundo do canal e as forças de pressão hidrostática na seção de montante e de jusante. Esse processo é representado através da equação dinâmica:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

onde Q é a vazão em m^3/s ; A é a área da seção molhada em m^2 ; x é a distância no sentido longitudinal em m ; y é a altura da lâmina líquida em m ; g é a aceleração da gravidade em m/s^2 ; S_0 é a declividade média do fundo do canal em m/m e S_f é a declividade da linha de energia em m/m .

Cada termo da equação dinâmica representa aspectos diferentes das forças atuantes sobre o volume de controle. A descrição de cada parcela da equação dinâmica está exposta no Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Descrição dos termos da equação dinâmica.

Termo	Força	Descrição
gAS_f	Atrito	Força de atrito com o fundo e com as margens do rio, que tende a desacelerar o escoamento.
gAS_0	Peso	Força resultante do peso da massa da água no volume de controle.
$gA \frac{\partial y}{\partial x}$	Pressão	Força associada à diferença de pressão entre os contornos de montante e jusante do volume de controle.
$\frac{\partial (\frac{Q^2}{A})}{\partial x}$	Inércia advectiva	Advecção de quantidade de movimento para dentro do volume de controle.
$\frac{\partial Q}{\partial t}$	Inércia local	Aceleração local da água no volume de controle.

Fonte: Adaptado de Fan *et al.* (2014)

O termo S_f equivale ao termo de perda de carga unitária por atrito, geralmente expresso a partir da equação de Manning:

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (3)$$

As equações 1 e 2 formam o conjunto de equações de Saint-Venant na forma completa, as quais descrevem o escoamento unidimensional não-permanente gradualmente variado.

Chow (1959) classificou os modelos de escoamento em hidrológicos e hidráulicos. Os modelos hidrológicos são aqueles que consideram apenas o efeito do armazenamento no escoamento (representado pela equação da continuidade), desprezando os efeitos da equação da quantidade de movimento. Já os modelos de escoamento que utilizam as equações de Saint-Venant são classificados como modelos hidráulicos, os quais são divididos em modelos de onda cinemática, difusão e hidrodinâmico.

Os modelos que utilizam a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento, desprezando-se os termos de pressão e de inércia, são ditos modelos de onda cinemática. Os modelos que consideram os termos de pressão, atrito e gravidade são denominados modelos de difusão. Os modelos hidrodinâmicos são aqueles que consideram todos os termos da equação da quantidade de movimento, ou seja, utilizam as equações completas de Saint-Venant para representar o escoamento. No Quadro 3 é apresentado um resumo das características dos modelos de escoamento.

Quadro 3 – Resumo das características dos modelos de escoamento.

Modelos	Características			
	Distribuído	Efeito de jusante	Termo de pressão	Termos de inércia
Armazenamento	Não	Não	Não	Não
Onda cinemática	Sim	Não	Não	Não
Difusão	Sim	Sim	Sim	Não
Hidrodinâmico	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Tucci (2005b)

Dependendo do objetivo do estudo e das características do sistema modelado, as equações unidimensionais de Saint-Venant podem não simular adequadamente o escoamento. Em áreas onde ocorrem trocas de volume de água entre a calha principal do rio e a planície de inundação, por exemplo, a aplicação de modelos hidrodinâmicos 2D ao sistema rio-planície se mostra mais satisfatória por melhor representar o escoamento tanto na calha principal quanto sobre a planície (PAZ, 2010).

Enquanto confinado à calha principal, a direção do fluxo da água é predominantemente longitudinal, sendo o escoamento bem representado pelos modelos hidrodinâmicos 1D. No entanto, com o extravasamento para a planície, o fluxo passa a seguir de forma independente do escoamento principal no canal, se propagando em outras direções, as quais não são consideradas na abordagem 1D (PAZ, 2010). Sendo assim, tal abordagem não é indicada para estudos cujo objetivo seja avaliar a propagação da inundação sobre a planície (HUNTER *et al.*, 2007).

As equações de Saint-Venant também podem ser utilizadas para simular o escoamento não-permanente bidimensional, tendo como variáveis a profundidade e as velocidades nas direções que definem o plano horizontal, conforme as equações apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{0x} - S_{fx}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy}) \quad (6)$$

onde t é o tempo em s; u é a velocidade média do escoamento na direção x em m/s; v é a velocidade média do escoamento na direção y em m/s; g é a aceleração da gravidade em m²/s; h é a altura da lâmina d'água em m; S_{0x} é a declividade média do fundo do canal na direção x em m/m; S_{fx} é a declividade da linha de energia na direção x em m/m; S_{0y} é a declividade média do fundo do canal na direção y em m/m e S_{fy} é a declividade da linha de energia na direção y em m/m.

O acoplamento da modelagem hidrológica e hidrodinâmica fornece uma representação completa do processo de escoamento das águas superficiais, sendo bastante aplicado em diversos estudos de drenagem e inundações tais como mapeamento das áreas inundáveis (CHORMANSKI *et al.*, 2011; GRIMALDI *et al.*, 2013; BOZZA *et al.* 2016; MONTE *et al.*, 2016), avaliação da eficiência de medidas estruturais e compensatórias para o controle de inundações (GÜL; HARMANÇİOĞLU; GÜL, 2009; SILVA; CABRAL, 2014; MARTINS, 2015; SILVA JUNIOR *et al.*, 2017), desenvolvimento de sistemas de alerta de enchentes (SILVA *et al.*, 2014) e geração de índices de risco de inundação (ZONSEIN, 2007; RIBEIRO NETO; COUTINHO; BATISTA, 2016).

Sendo assim, a modelagem hidrológica-hidrodinâmica tem se mostrado uma importante ferramenta para a compreensão do processo de formação das inundações e para definição de estratégias de mitigação, subsidiando o processo de tomada de decisão na gestão de risco de inundações.

2.4 DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

Um dos principais desafios relacionados à modelagem, principalmente à modelagem hidrodinâmica, é a dificuldade em representar os parâmetros físicos do ambiente. Embora as bases altimétricas globais, como o projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), tenham sua importância consagrada e ainda sejam importantes para realização de diversos estudos, os seus produtos não atendem demandas que necessitam de dados topográficos de alta resolução, como exemplo de projetos de engenharia ou simulações hidrodinâmicas, os quais comumente requerem precisão na ordem de centímetros.

A resolução dos dados topográficos desempenha um papel importante na determinação da precisão do mapeamento da planície de inundação, sendo apontada como uma das principais fontes de incerteza no processo de modelagem hidrodinâmica (TATE *et al.*, 2002; BATES; MARKS; HERRITT, 2003).

Estudos mostram que a área da mancha de inundação tende a aumentar com a redução da resolução das informações espaciais, sugerindo que resoluções grosseiras superestimam a extensão da inundação (COOK; MERWADE, 2009; SAKSENA; MERWADE, 2015).

Atualmente, os dados topográficos obtidos através da tecnologia LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*) são tidos como os mais confiáveis para modelagem hidrodinâmica, devido à sua alta resolução horizontal e precisão vertical (HOHENTHAL *et al.*, 2011), as quais chegam a ser inferiores a 50 cm (ABDULLAH *et al.*, 2012).

Como consequência, o mapeamento de áreas inundáveis utilizando dados LiDAR é muito mais preciso em comparação com os mapas de inundação derivados de outros conjuntos de dados topográficos disponíveis (ALVES *et al.*, 2017; CASAS *et al.*; 2006; SCHUMANN *et al.*, 2008).

A tecnologia LiDAR baseia-se na emissão de um feixe laser infravermelho em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e são captados pelo sensor. Para cada feixe emitido, é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave e o ângulo do espelho de varredura correspondente ao instante da emissão do pulso. Com essas informações, associadas a altitude e posição relativa da aeronave, são determinadas as elevações do terreno ou dos objetos na superfície.

Diante da qualidade dos dados fornecidos pelo LiDAR e da importância e necessidade de criação de um banco de dados de alta resolução topográfica, foi iniciado o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), o qual reúne produtos cartográficos resultantes do recobrimento aerofotogramétrico e mapeamento a laser do território do estado de Pernambuco. A princípio, o mapeamento foi realizado no território das bacias do rio Una, Mundaú e Sirinhaém, atingidas pelas grandes enchentes de 2010/2011. O mapeamento permitiu obter, com rapidez e qualidade, as informações altimétricas necessárias para elaboração dos projetos das barragens de controle de cheias, desenvolvimento de modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica e identificação de áreas de risco e desapropriações (CIRILO *et al.*, 2014). Posteriormente, o mapeamento foi estendido para todo território

pernambucano. As informações técnicas dos produtos do PE3D podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações técnicas dos produtos do PE3D.

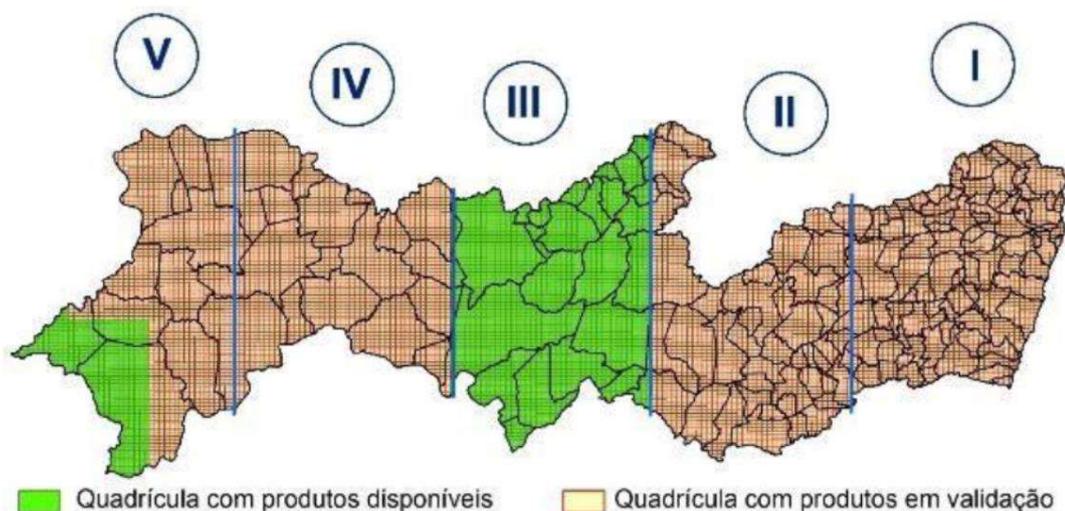
	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento Laser	Ortofoto	Perfilamento Laser
Extensão dos arquivos	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m ²	-	~ 4 pontos/m ²
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	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

Fonte: Alves (2017)

*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.

O levantamento dos produtos na escala 1:5000 foi realizado em todo estado de Pernambuco, o qual foi dividido em 13.115 quadrículas, agrupadas em cinco blocos, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Divisão dos blocos e quadrículas do mapeamento do PE3D.



Fonte: Alves (2017)

Adicionalmente, 870 km² distribuídos em áreas urbanas de 26 municípios foram contempladas com o recobrimento aerofotogramétrico e o perfilamento a laser na escala de 1:1000. Somando-se ao trabalho na mesma escala desenvolvido pela COMPESA, têm-se hoje 41 sedes municipais com levantamento compatível com a escala 1:1000. Todos os produtos encontram-se georreferenciados no sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000, nos fusos 24S e 25S.

Os produtos do PE3D têm sido bastante aplicados a estudos de inundações, permitindo uma melhor performance dos modelos hidrodinâmicos e melhor precisão na definição das áreas inundáveis.

Santos (2013) aplicou os dados do PE3D na modelagem hidrodinâmica para avaliação da propagação e controle de cheias na bacia do rio Mundaú, a qual apresenta alta declividade. Os dados altimétricos em conjunto com as ortofotos permitiram criar os elementos necessários para a modelagem, tais como a tipologia de uso e ocupação de solo na bacia, a definição das seções do leito maior de escoamento e o perfil longitudinal do rio.

Ribeiro Neto *et al.* (2015) utilizaram os dados do PE3D na caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una, na zona da Mata Sul de Pernambuco,

reconstituindo o evento de 2010. A extensão da área inundada simulada apresentou boa aderência ao levantamento feito em campo.

Alves *et al.* (2017) utilizaram os dados de altimetria do PE3D para reprodução das inundações de 2010 na área urbana das cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros, todas inseridas na bacia do rio Una. Através da modelagem hidrodinâmica bidimensional foi possível reconstituir com precisão a mancha de inundação e também avaliar o efeito das barragens na extensão da inundação.

Nascimento e Ribeiro Neto (2017) utilizaram as ortofotos em conjunto com os dados topográficos do PE3D para caracterizar os reservatórios de abastecimento de água da bacia do rio Pajeú. Como resultado, foi possível eficientemente detectar os pequenos reservatórios na bacia, bem como estimar sua capacidade de armazenamento. De acordo com os autores, a metodologia apresentada no estudo se mostra mais confiável e precisa do que as outras levantadas na literatura devido à alta resolução dos produtos do PE3D.

Silva (2019) utilizou os dados do PE3D na simulação hidrológica e hidrodinâmica de eventos intensos e de cenário de aumento do nível dos mares na bacia do rio Tejipió, na cidade do Recife. A partir do seu estudo foi possível realizar uma caracterização mais precisa da bacia, bem como a delimitação das áreas inundáveis.

Ferraz (2019) utilizou os dados do PE3D na simulação hidrodinâmica dos principais eventos de cheia da bacia do rio Sirinhaém, com o intuito de reconstituir a mancha de inundação na área urbana dos municípios de Barra de Guabiraba, Cortês, Gameleira e Sirinhaém. A simulação conseguiu reproduzir satisfatoriamente os eventos avaliados. Além disso, foi possível avaliar o percentual de redução das áreas inundáveis decorrentes da construção de barragens na bacia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

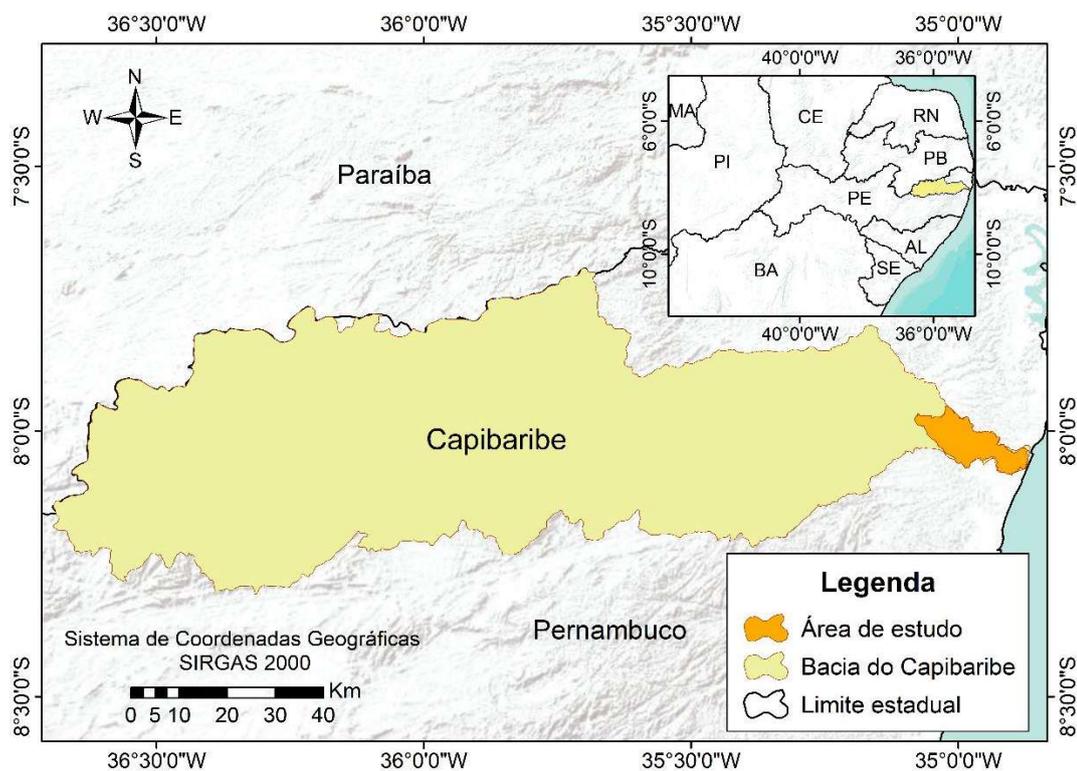
Neste capítulo está caracterizada a área de estudo e também são conceituados os materiais e métodos utilizados na modelagem hidrológica e hidrodinâmica.

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE

A área de estudo do presente trabalho abrange parte da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, do posto fluviométrico de São Lourenço da Mata até a foz, com enfoque no Recife. A escolha dessa área foi devido à proximidade da estação fluviométrica de São Lourenço com o município do Recife, de modo que as vazões ali registradas podem ser consideradas as mesmas que atingem o Recife (BARROS, 1979).

A área de estudo possui 138,8 km², da qual 46,6% está inserida na cidade do Recife, 29,8% está inserida na cidade de São Lourenço e 23,6% em Camaragibe. A Figura 4 apresenta o mapa de localização da área de estudo.

Figura 4 – Mapa da localização da área de estudo.

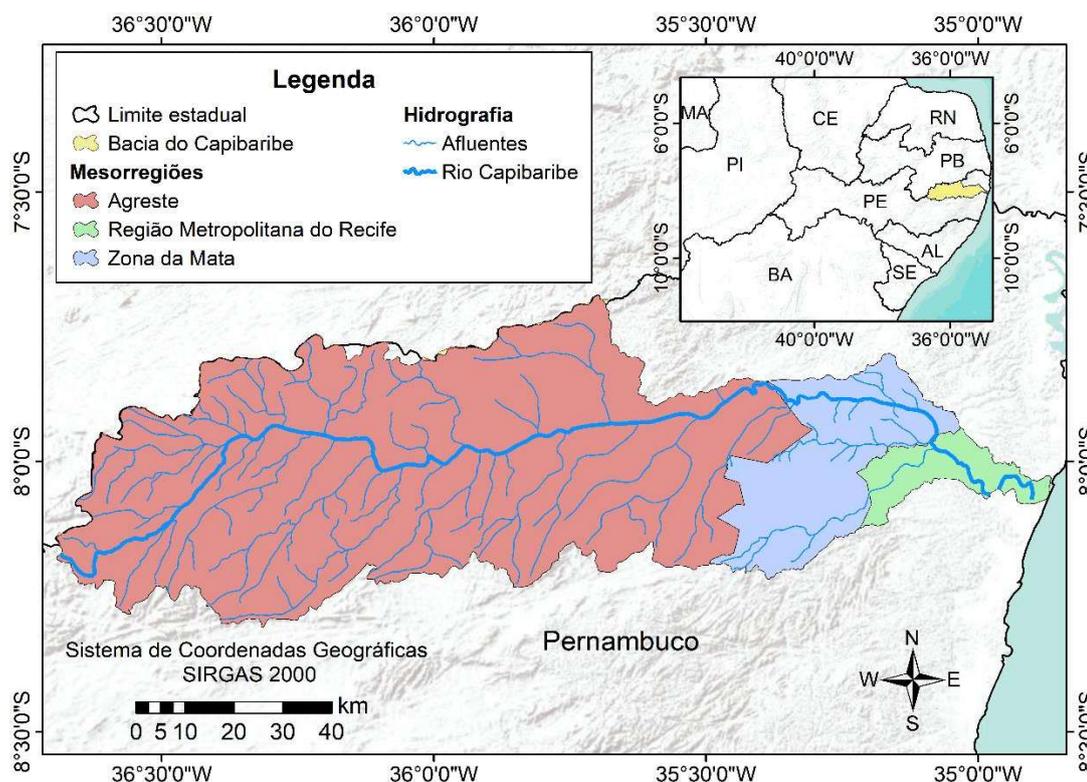


Fonte: A autora (2019)

3.1.1 Localização e generalidades

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe, que corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico 2 (UP2) em Pernambuco, está localizada na porção norte-oriental do estado de Pernambuco, entre $07^{\circ} 41' 20''$ e $08^{\circ} 19' 30''$ de latitude sul, e $34^{\circ} 51' 00''$ e $36^{\circ} 41' 58''$ de longitude oeste. No espaço territorial do estado, situa-se nas regiões de desenvolvimento do Agreste Central e Setentrional, Mata Norte e Mata Sul e da Região Metropolitana, conforme mostrado na Figura 5. Devido à sua abrangência regional, a bacia exibe um ambiente complexo, caracterizado pela alta variabilidade climática, de solos, cobertura vegetal, além dos aspectos socioeconômicos.

Figura 5 – Mapa da localização da bacia do rio Capibaribe.



Fonte: A autora (2019)

A bacia do Capibaribe foi dividida em quatro Unidades de Análise (UA) de acordo com suas características hidrológicas, climatológicas e socioeconômicas. A UA1 (Unidade de Toritama) abrange aproximadamente o terço superior da bacia; A UA2 (Unidade de Jucazinho) envolve parte da bacia que vai desde Toritama até o reservatório Jucazinho; A UA3 (Unidade de Limoeiro) compreende as áreas de drenagem do Capibaribe desde o reservatório Jucazinho até o reservatório Carpina, e a UA4 (Unidade de São Lourenço da Mata) abrange as áreas de drenagem do terço inferior da bacia.

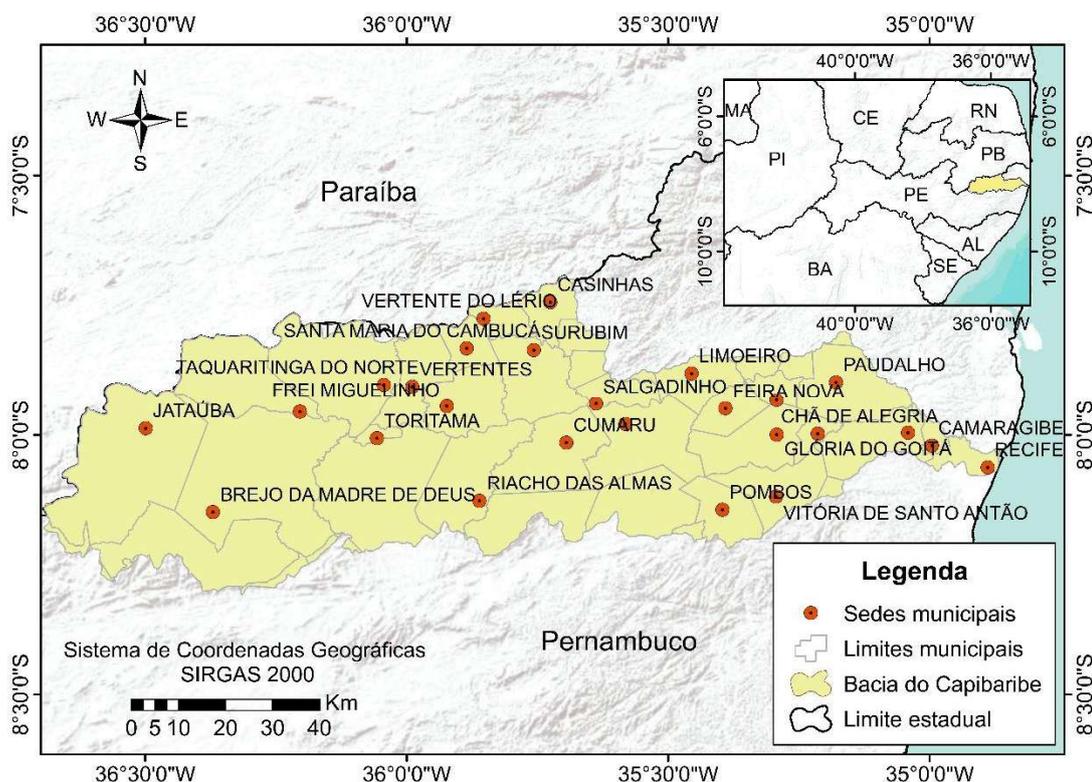
A área da bacia compreende cerca de 7,6% do território pernambucano, correspondendo à uma área de 7.455 km². É uma das mais importantes bacias pernambucanas, drenando 42 municípios (Tabela 4), dos quais 15 estão totalmente inseridos na bacia e 26 possuem sua sede na bacia (PERNAMBUCO, 2010). Na Figura 6 são apresentados os municípios que compõem a bacia do Capibaribe, com destaque para aqueles que possuem sede dentro da bacia.

Tabela 4 - Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)
Belo Jardim	5,50	Gravatá	3,22	Salgadinho	1,12
Bezerros	2,97	Jataúba	9,57	Sanharó	0,08
Bom Jardim	0,73	João Alfredo	0,72	Santa Cruz do Capibaribe	4,55
Brejo da Madre de Deus	10,19	Lagoa do Carro	0,52	Santa Maria do Cumbucá	1,18
Camaragibe	0,46	Lagoa do Itaenga	0,76	São Caetano	0,17
Carpina	4,02	Limoeiro	1,85	São Lourenço da Mata	2,82
Caruaru	7,13	Moreno	0,21	Surubim	3,44
Casinhas	1,41	Passira	4,57	Tacaimbó	0,35
Chã de Alegria	0,66	Paudalho	3,57	Taquaritinga do Norte	5,96
Chã Grande	0,18	Pesqueira	0,05	Toritama	0,41
Camaru	3,99	Poção	0,23	Tracunhaém	0,14
Feira Nova	1,42	Pombos	2,04	Vertente do Lério	0,94
Frei Miguelinho	2,93	Recife	0,92	Vertentes	2,62
Glória do Goitá	3,11	Riacho das Almas	4,11	Vitória de Santo Antão	2,71

Fonte: PERNAMBUCO (2010)

Figura 6 – Municípios com sede dentro da bacia do rio Capibaribe.



Fonte: A autora (2019)

3.1.2 Hidrografia

O principal rio pertencente à bacia é o rio Capibaribe, que nasce na divisa dos municípios de Jataúba e Poção, no Agreste pernambucano, a uma altitude aproximada de 1.000 m, e deságua na cidade do Recife, na costa do oceano Atlântico, após percorrer uma extensão total de cerca de 280 km.

Durante sua trajetória, o rio Capibaribe recebe cerca de 70 afluentes nas duas margens. Seus principais afluentes pela margem direita são: riacho do Mimoso, riacho Tabocas, riacho da Onça, riacho Carapatós, riacho das Éguas, riacho Caçatuba, riacho Batatã, rio Cotunguba, rio Goitá e rio Tapacurá. Pela margem esquerda, destacam-se: riacho Jataúba, riacho Doce, riacho Topada, riacho do Manso e riacho Cajai.

O rio Capibaribe apresenta regime fluvial intermitente nos seus alto e médio cursos, tornando-se perene no seu baixo curso. O Alto Capibaribe compreende o percurso entre sua nascente e o município de Taquaratinga do Norte, onde predominam as maiores altitudes da bacia, influenciadas pelo Planalto da Borborema. O Médio Capibaribe segue até o município de Limoeiro, onde o regime hidrológico deixa de ser intermitente. Já o Baixo Capibaribe abrange o resto do percurso do rio até sua foz.

As descargas registradas no posto fluviométrico de São Lourenço da Mata demonstram a variabilidade dos deflúvios anuais, os quais variam entre 0,4 e 1,2 bilhão de m³. Em épocas de estiagem, as vazões observadas no posto são de poucos m³/s. Já durante as grandes enchentes, o pico de vazão chega a atingir valores da ordem de 3.000 m³/s. Esses dados revelam o caráter tipicamente torrencial do rio, sendo seus defluxos diretamente dependentes do regime pluviométrico.

3.1.3 Clima

A bacia do rio Capibaribe apresenta dois tipos climáticos distintos. No alto e médio curso, localizados no Agreste, predomina o clima quente e semiárido, enquanto que seu baixo curso apresenta clima quente tropical úmido.

Em relação à produção de chuvas, a bacia do rio Capibaribe apresenta alta variabilidade espacial da precipitação, com valores médios que vão de 550 mm/ano, no alto curso, à 24000 mm/ano, no baixo curso (RIBEIRO NETO *et al.*, 2014).

As precipitações no alto e médio curso dependem, em sua maior parte, do sistema meteorológico do tipo Zona de Convergência Intertropical, atuante entre os meses de fevereiro e julho, com as máximas precipitações durante abril e maio. Em anos muito chuvosos, esse sistema pode provocar inundações, principalmente na Região Metropolitana do Recife (PERNAMBUCO, 2010). Em anos nos quais esse sistema não atua, ocorrem longas estiagens, especialmente no semiárido.

O sistema meteorológico Ondas de Leste também atua na região da bacia do Capibaribe, principalmente no período de maio a agosto. É o principal determinante

das ocorrências chuvosas no litoral, podendo produzir chuvas intensas e inundações e, em alguns casos, penetrar até 300 km dentro do continente (PERNAMBUCO, 2010).

A temperatura anual média na bacia oscila entre 20,46°C e 26,14°C, enquanto que a temperatura máxima oscila entre 25,50°C e 29,92°C. No decorrer do ano, as temperaturas na região apresentam um comportamento mensal médio semelhante, no qual é possível distinguir-se dois períodos: um período aproximado entre os meses de abril e setembro, quando são observadas as menores médias mensais térmicas, e o período de outubro a março, no qual essas médias térmicas elevam-se, atingindo uma amplitude entre os menores e maiores valores observados em torno dos 7,5°C para as temperaturas mínimas, dos 7,00°C para as temperaturas médias e dos 6,60°C para as temperaturas máximas (PERNAMBUCO, 2010).

A evaporação na bacia também apresenta comportamento bastante heterogêneo. Dentro da UA1, a evapotranspiração potencial varia de 1700 a 1850 mm/ano, no sentido de norte a sul. Com o mesmo sentido de crescimento da evapotranspiração potencial, a UA2 apresenta uma variação de 1600 a 1900 mm/ano. Quanto a UA3, observa-se uma diminuição da evapotranspiração à medida que se aproxima do reservatório Carpina, ao nordeste da área, atingindo um valor em torno de 1580 mm/ano. Por fim, o comportamento desta variável climatológica dentro da UA4 apresenta valores maiores na região sudoeste, em torno de 1700 mm/ano, com uma diminuição em direção ao litoral, onde o valor cai para 1500 mm/ano.

3.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA CIDADE DE RECIFE

A cidade do Recife compreende quase metade da área de estudo e está localizada na parte mais baixa da bacia, o que a torna mais vulnerável às inundações do que as outras cidades que compõem a área de estudo. Sendo assim, é pertinente caracterizar a cidade do Recife em termos de seus aspectos fisiográficos.

3.2.1 Características gerais

O Recife é uma cidade litorânea, localizada na Região Nordeste do Brasil, fortemente urbanizada e constantemente acometida por alagamentos. Possui uma área de 218,50 km², uma população estimada em 1.637.834 habitantes e uma densidade demográfica de 7.040 hab/km². Compõe juntamente com outros 13 municípios a Região Metropolitana do Recife (RMR), a qual constitui a maior aglomeração urbana do Nordeste brasileiro e a quinta maior do país, sendo classificada como uma metrópole nacional (IBGE, 2010).

O processo de urbanização do Recife ocorreu de modo desordenado, resultando na ocupação de espaços impróprios para habitação, tais como áreas inundáveis, morros e encostas. Nesse processo de expansão, não foram considerados os aspectos relativos ao escoamento das águas pluviais e à drenagem natural. Sendo assim, observa-se uma redução da capacidade natural de escoamento das águas superficiais e sobrecarga das estruturas de drenagem, criando pontos críticos de alagamento durante os períodos chuvosos.

No início da formação do Recife, estima-se que o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) era da ordem de 0,15, ou seja, 15% da água precipitada escoava superficialmente. Atualmente, o *runoff* está estimado em 0,80 (EMLURB, 2016), o que implica maior volume de água aportando na rede de drenagem.

Para agravar o problema dos alagamentos, alguns dos serviços de saneamento básico ainda deixam a desejar, como é o caso do esgotamento sanitário, o qual apresenta forte influência sobre os sistemas de drenagem das águas pluviais urbanas. De acordo com o IBGE (2010), 55% dos domicílios estão conectados à rede geral de esgoto ou pluvial, 15,6% possuem fossa séptica e 29,4% dos domicílios possuem outro tipo de esgotamento (vala, fossa rudimentar, corpos hídricos, etc.). Devido à junção dos domicílios ligados à rede geral de esgotos e à rede pluvial, na informação fornecida pelo IBGE, não se tem o número real de domicílios ligados à rede de esgotos, o que prejudica a análise das reais condições dos serviços de esgotamento sanitário do município.

A grande ocorrência de ligações clandestinas de esgoto em galerias de águas pluviais ou o lançamento dos dejetos diretamente nos rios e canais acarretam diversos problemas ao sistema de drenagem urbana, tais como sobrecarga do sistema devido ao recebimento de uma vazão adicional, a qual não foi considerada no projeto, assoreamento dos canais, poluição hídrica, corrosão das tubulações devido à presença de sulfetos, entre outros.

Em relação aos resíduos sólidos, o Censo de 2010 revelou que os serviços de limpeza urbana, por meio de coleta direta, abrangem 94,7% dos domicílios e o serviço realizado de modo indireto (caçambas) atinge 3,2%, totalizando 97,9% dos domicílios da cidade. Apesar do elevado índice de coleta, ainda é observada a disposição indevida de resíduos sólidos nas ruas, em terrenos baldios e nas margens de cursos d'água, os quais acabam atingindo o sistema de drenagem, obstruindo as suas estruturas e reduzindo a capacidade de escoamento, favorecendo a ocorrência de inundações.

3.2.2 Geologia e relevo

O município do Recife é constituído geologicamente por rochas sedimentares formadoras das bacias sedimentares costeiras Pernambuco-Paraíba e Vulcano-Sedimentar do Cabo, sedimentos de cobertura da Formação Barreiras e sedimentos recentes da Planície do Recife (CPRM, 2001).

A Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba ocorre ao norte do Lineamento de Pernambuco, se estendendo desde a cidade do Recife até o limite nordeste do estado, prolongando-se ainda por toda a costa do estado da Paraíba e parte do Rio Grande do Norte. No Recife, ela é representada apenas pela sua formação de base, a Formação Beberibe, a qual é composta por uma sequência de areia grossa, de origem fluvial, com intercalações de silte, característica que lhe confere alto potencial hidrogeológico (PFALTZGRAFF, 2007).

A Bacia Vulcano-Sedimentar do Cabo ocorre ao sul do Lineamento de Pernambuco, se estendendo da região sul da cidade do Recife para Jaboatão dos

Guararapes e depois para o município do Cabo. É composta por rochas siliciclásticas, carbonáticas e vulcânicas, mas na planície do Recife é representada pela sua formação de base, a Formação do Cabo, um conjunto de rochas siliciclásticas, de origem continental, formada por arenitos, arcóseos, siltitos, argilitos e conglomerados polimíticos de matriz arcoseana (PFALTZGRAFF, 2007).

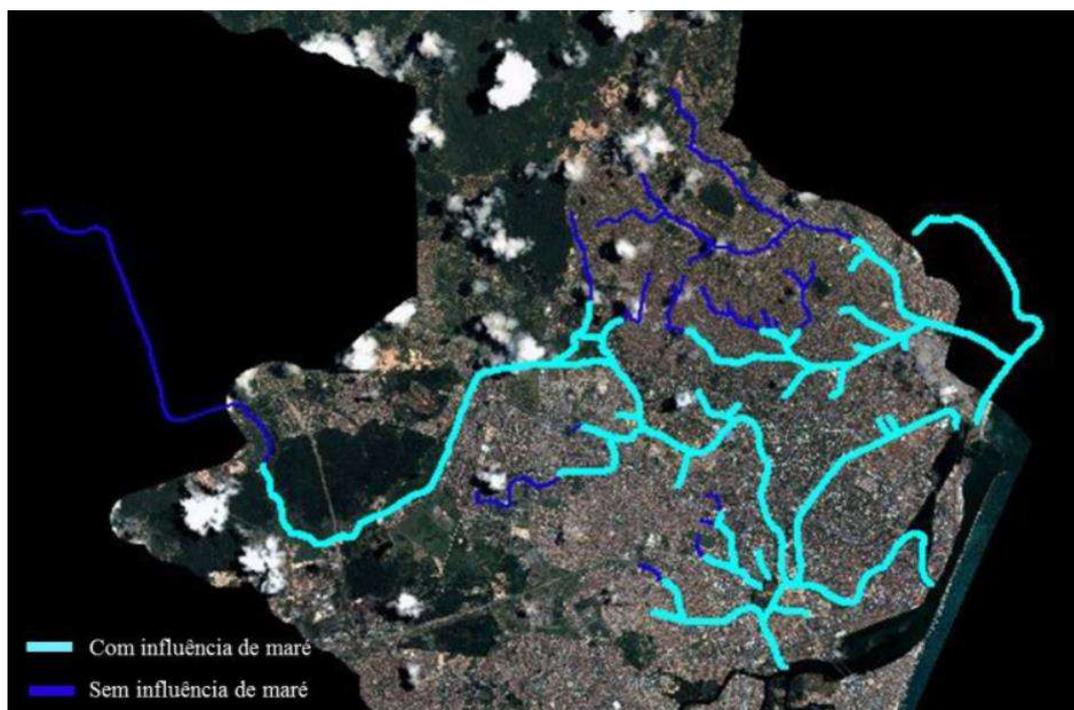
Recobrando indistintamente as unidades sedimentares supracitadas, encontra-se a Formação Barreiras, cuja composição caracteriza-se por depósitos de areias grossas, intercaladas por estratos de areia fina e/ou argila, que por suas próprias características granulométricas e mineralógicas são bastante friáveis e facilmente erodíveis, favorecendo, portanto, episódios de deslizamentos.

Sobre todas essas unidades geológica, encontram-se os sedimentos de idade quaternária, denominados sedimentos recentes da Planície do Recife. Esses sedimentos estão representados por terraços marinhos pleistocênicos, terraços marinhos holocênicos, sedimentos flúvio-lagunares, recifes de arenito, sedimentos de praia, sedimentos aluvionares e pelos sedimentos de mangue.

O relevo do Recife é basicamente composto por uma planície cercada por uma cadeia de morros, numa conformação similar à um anfiteatro. A planície se estende ao longo da região costeira, na porção Centro-Leste da cidade. Essa unidade corresponde às superfícies baixas e planas, com cotas variando desde o nível do mar até 10 metros. Os morros, por sua vez, estão localizados nas porções Norte, Oeste e Sul, apresentando cotas que variam entre 30 e 150 m.

As baixas cotas da planície costeira, que em algumas regiões chega a ser abaixo do nível do mar, torna o Recife sujeito à influência das marés. O alcance da maré ao longo da planície do Recife foi determinado por Alcoforado (2006) e pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Incursão da maré sobre o Recife.

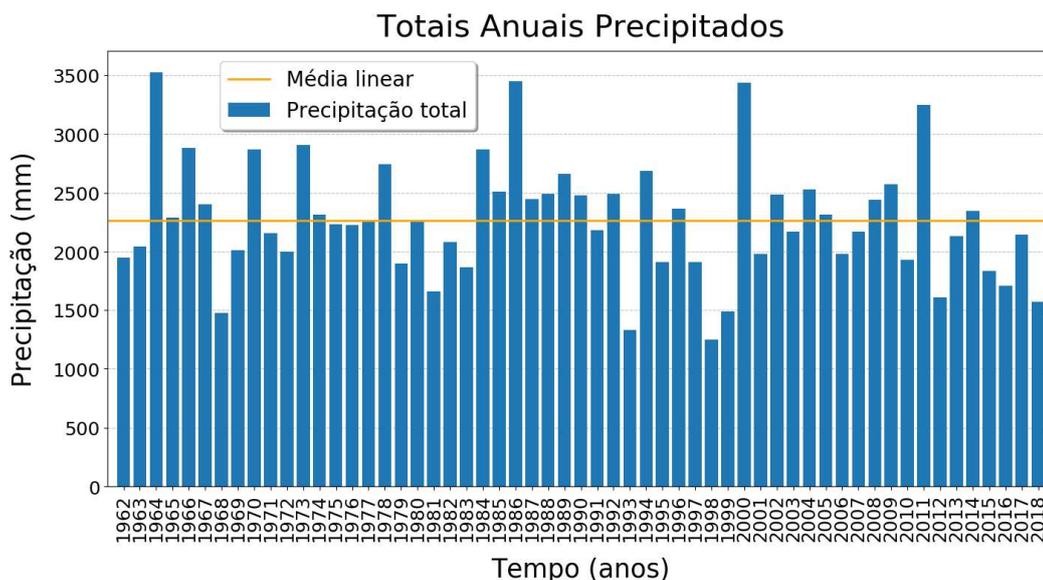


Fonte: Alcoforado (2006)

3.2.3 Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima do Recife enquadra-se no tipo “As” – clima tropical quente e úmido, com estação seca de verão. Possui alta pluviosidade, com total anual médio de 2267,3 mm e máximo anual médio de 121,3 mm, calculados a partir dos dados da estação Recife-Curado do INMET, para o período de 1962 a 2018. A Figura 8 apresenta a variação da precipitação total anual do posto Recife-Curado.

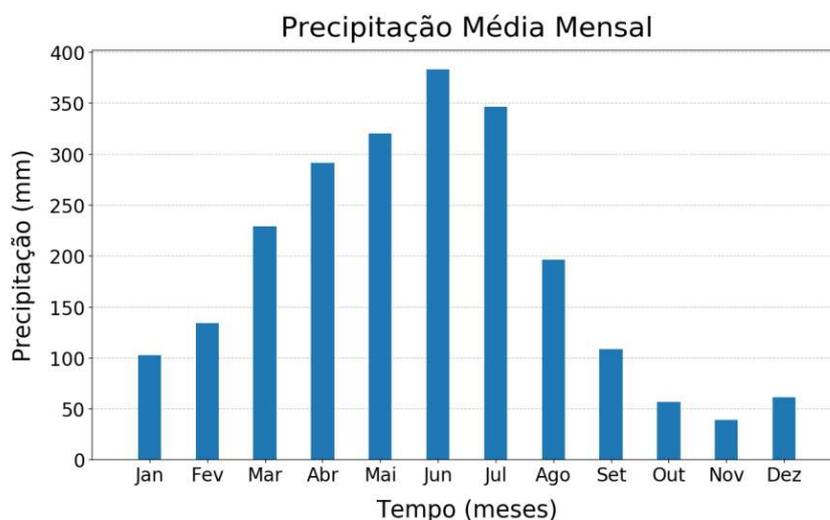
Figura 8 - Precipitação total anual no Recife.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da estação Recife-Curado do INMET

O Recife apresenta apenas dois períodos climáticos no ano: o período chuvoso e o período seco. O período chuvoso compreende os meses de março a agosto, com pluviosidade máxima no mês de junho (383 mm). Já o período seco vai de setembro a fevereiro e apresenta totais pluviométricos muito baixos, com pluviosidade mínima em novembro (38,9 mm). Na Figura 9 é apresentada a distribuição das precipitações médias mensais do posto Recife-Curado.

Figura 9 – Médias mensais de precipitação no Recife.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da estação Recife-Curado do INMET

As normais climatológicas de evaporação total, temperatura média, umidade relativa e insolação para o período de 1989 a 2010, na estação Recife-Curado do INMET, estão dispostas na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Normais climatológicas para o período de 1989 a 2010 na estação Recife-Curado.

Meses	Evaporação total (mm)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa (%)	Insolação (horas)
Janeiro	160,2	26,9	74,4	233
Fevereiro	133,9	27,1	75,1	210,5
Março	127,9	27,1	77,2	227,6
Abril	96,5	26,5	81,3	198,3
Mai	87,6	25,7	83,7	186
Junho	82,5	24,7	84,8	161,1
Julho	88,6	24,1	84,2	175,2
Agosto	107,1	24,2	81,3	195,2
Setembro	133,3	25,1	77,5	215,6
Outubro	160,5	25,9	74,1	242,6
Novembro	169,1	26,6	72,7	245,4
Dezembro	174,2	26,9	73,3	246
Média mensal	126,8	25,9	78,3	211,4
Total Anual	1521,4	-	-	2536,5

Fonte: INMET¹

Considerando as normais climatológicas, tem-se que evaporação total na cidade do Recife alcança valores de 1521,4 mm/ano e a média mensal é de 126,8 mm, sendo o valor máximo observado em dezembro, o qual é de 174,2 mm.

A temperatura média anual é de 25,9°C, com valor máximo médio mensal de 27,1°C, nos meses de fevereiro e março, e média mínima mensal de 24,1°C no mês de julho, apresentando, portanto, uma amplitude térmica média anual de 3°C.

A umidade relativa do ar apresenta um valor médio mensal de 78,3%, reflexo da abundância das águas da região estuarina e da proximidade da cidade com o oceano, recebendo as massas de ar úmido ali geradas e trazidas para a região costeira do continente (CABRAL; ALENCAR, 2005).

¹Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 19 mai. 2019.

O Recife apresenta elevada taxa de insolação, sendo a média anual de 2536,5 horas, com máxima mensal de 245,4 horas em novembro e mínima de 175,2 em julho.

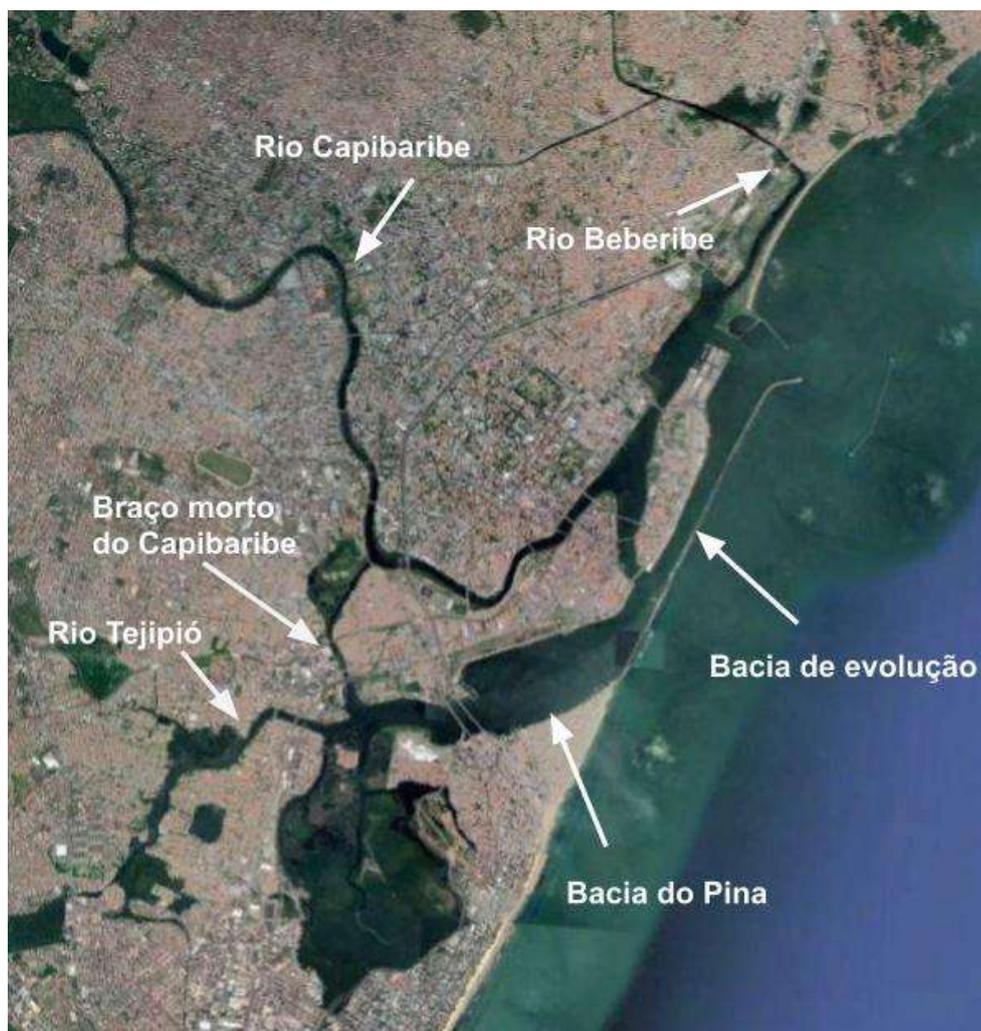
3.2.4 Rede de macrodrenagem

O Recife está localizado em uma área naturalmente alagável. No entanto, ao longo do seu processo de urbanização, houve uma redução de cerca de 60% da área natural de rios, mangues, lagoas e sua cobertura vegetal primitiva reduzida para 4%, fazendo com que passasse de escoadouro de deflúvios para geradora de escoamentos (EMLURB, 2016).

O município conta com um sistema natural de drenagem que envolve o sistema de bacias hidrográficas do chamado “Estuário Comum do Recife”, constituídos pelas desembocaduras dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipló.

Esse estuário compreende basicamente a denominada bacia do Pina e a bacia de evolução do porto, situada ao longo da faixa de cais, com formato retangular, medindo cerca de 3,00 km de extensão, com largura variando entre 160 e 475 m e profundidades variando entre 9 e 12 m (EMLURB, 2016). A Figura 10 apresenta o “estuário comum do Recife”.

Figura 10 - Estuário comum do Recife.



Fonte: Google Earth

A rede de drenagem dessas bacias é composta por 99 canais, somando 132,787 km de extensão, o que significa uma média de 0,99 km de canal por km². A rede de canais está distribuída nas bacias da seguinte maneira: bacia do Capibaribe com 33 canais, bacia do Beberibe com 25 canais, bacia do Tejipió com 35 canais e bacia do Jaboatão com 6 canais. Os canais da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe no município do Recife estão dispostos no Quadro 4.

Quadro 4 - Canais que compõem a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Bacia	Rio	Nome do canal
CAPIBARIBE	Capibaribe	Canal Joana Bezerra
		Canal Derby-Tacaruna
		Canal da Rua Ibiporã
		Canal Fernandinho
		Canal Travessa Realeza
		Canal do Chile
		Canal Santa Terezinha
		Canal do Cohab
		Canal do Torreão
		Canal do Sport
		Canal do Prado
		Canal do Zumbi
		Canal do Valença
		Canal do ABC
		Canal do IPA
		Canal do Serpro
		Canal do Parnamirim
		Canal Santa Rosa
		Canal do Cavouco
		Canal do Caiara
	Canal São Mateus	
	Canal do Buriti	
	Canal de Nova Descoberta	
	Canal do Córrego do Jenipapo	
	Canal do Golf Clube	
	Canal Torres Homem	
	Canal Vila Arraes	
	Canal Cosme e Damião	
	Camaragibe	Canal do Sítio dos Pintos
		Canal do Córrego da Fortuna
		Canal Marcos Freire
Riacho Dondon	Canal Jardim Terezópolis	
	Canal Brega e Chic	

Fonte: A autora (2019)

No Recife, a bacia do Capibaribe abrange, total ou parcialmente, 42 bairros: bairro do Recife, Santo Antônio, Ilha Joana Bezerra, Coelhos, Boa Vista, Paissandu, Santo Amaro, São José, Aflitos, Encruzilhada, Torreão, Soledade, Jaqueira, Graças,

Casa Amarela, Casa Forte, Santana, Parnamirim, Poço da Panela, Monteiro, Alto do Mandu, Apipucos, Nova Descoberta, Macaxeira, Dois Irmãos, Sítio dos Pintos, Córrego do Jenipapo, Madalena, Torre, Prado, Zumbi, Cordeiro, Iputinga, Cidade Universitária, Várzea, Caxangá, Ilha do Retiro, Afogados, Mustardinha, Bongü, Espinheiro e San Martin.

O rio Capibaribe recebe dois afluentes dentro do território municipal do Recife, o rio Camaragibe e o riacho Dondon. O rio Camaragibe nasce no município de mesmo nome e deságua no Capibaribe, a jusante da sua passagem sob a BR-101. Todo o trecho recifense desse rio apresenta ocupação ainda esparsa de suas margens, ao contrário do que ocorre no trecho no município de Camaragibe.

O riacho Dondon era originalmente afluente do rio Camaragibe, cruzando a rodovia BR-408 logo após a ponte da Caxangá, no sentido subúrbio. Entretanto, por conta da implantação de um conjunto residencial localizado entre a rodovia e o rio Camaragibe, foi realizado um desvio no seu traçado, a montante da BR-408, e o riacho Dondon passou a ser afluente direto do Capibaribe.

Do ponto de vista da hidrografia espacial, por conta da bifurcação do rio Capibaribe em dois braços, o rio pode influenciar dinamicamente o movimento das águas do estuário do Recife em dois locais distintos: o braço norte, que se encontra com o trecho final do rio Beberibe, desaguando parte de suas águas diretamente para o mar pela entrada do porto do Recife e parte para as bacias portuária e do Pina, pela Ponte 12 de Setembro (antiga ponte Giratória); e o braço sul (ou braço morto), que escoia pela Ilha do Retiro em uma foz comum com os rios Tejipió/Jiquiá e Jordão/Pina.

Atualmente o sistema de drenagem do Recife se encontra bastante canalizado, e suas margens frequentemente ocupadas de modo irregular. Tal característica associada à alta taxa de impermeabilização do solo, altos índices pluviométricos, baixo gradiente hidráulico, lençol freático elevado e influência das marés concorre para que alagamentos e inundações sejam recorrentes na cidade.

3.3 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.

3.3.1 Dados topográficos

Para a realização da simulação hidrológica são necessárias informações acerca da geomorfologia da área de estudo. Há diversos meios para obter essas informações, um deles é através de técnicas de Sensoriamento Remoto, a partir da qual é obtido o Modelo Digital do Terreno (MDT).

O MDT pode ser definido como uma matriz de números que representam a distribuição geográfica de elevações. Portanto, o MDT corresponde à representação de uma superfície real em meio digital, fornecendo a altimetria de um terreno sob a forma de uma grade regular de pontos.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados os produtos do perfilamento a laser na escala 1:1000 do programa PE3D, capturados no ano de 2014. Os produtos consistem em uma nuvem de pontos contendo as informações altimétricas do relevo, as quais foram convertidas para o formato raster, obtendo-se então o MDT da área de estudo.

3.3.2 Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de três bases de dados: do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA), do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

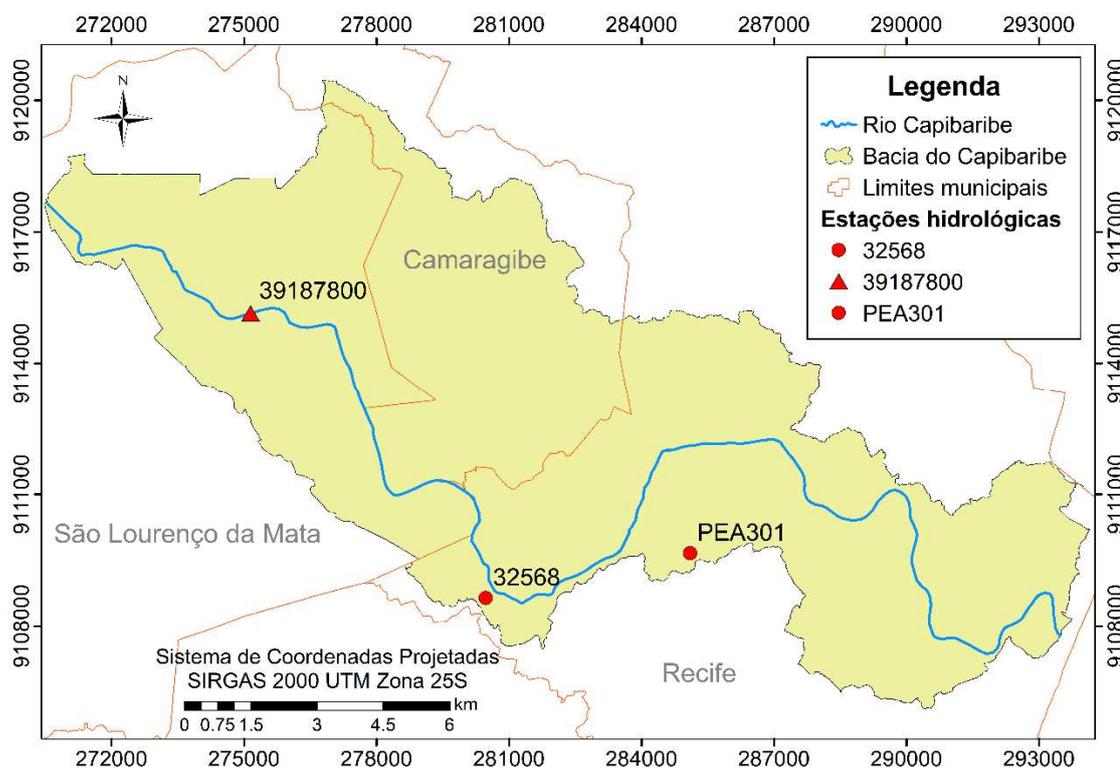
Para reconstrução da enchente de 2011, foram escolhidas estações hidrológicas telemétricas, com dados disponíveis entre 01/05/2011 e 06/05/2011, as quais compreenderam 2 estações pluviométricas e 1 estação pluviométrica/fluviométrica. A Tabela 6 apresenta as informações acerca das estações utilizadas e na Figura 11 podem ser visualizadas as suas disposições espaciais na área de estudo.

Tabela 6 - Relação das estações hidrológicas utilizadas.

Estação	Tipo	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
			Lat	Long	
Recife	Pluviométrica	32568	-8,059	-34,992	INPE
Recife (Curado)	Pluviométrica	PEA301	-8,05	-34,95	INMET
São Lourenço	Pluviométrica/fluviométrica	39187800	-8	-35,04	ANA

Fonte: A autora (2019)

Figura 11 - Localização das estações hidrológicas utilizadas.



Fonte: A autora (2019)

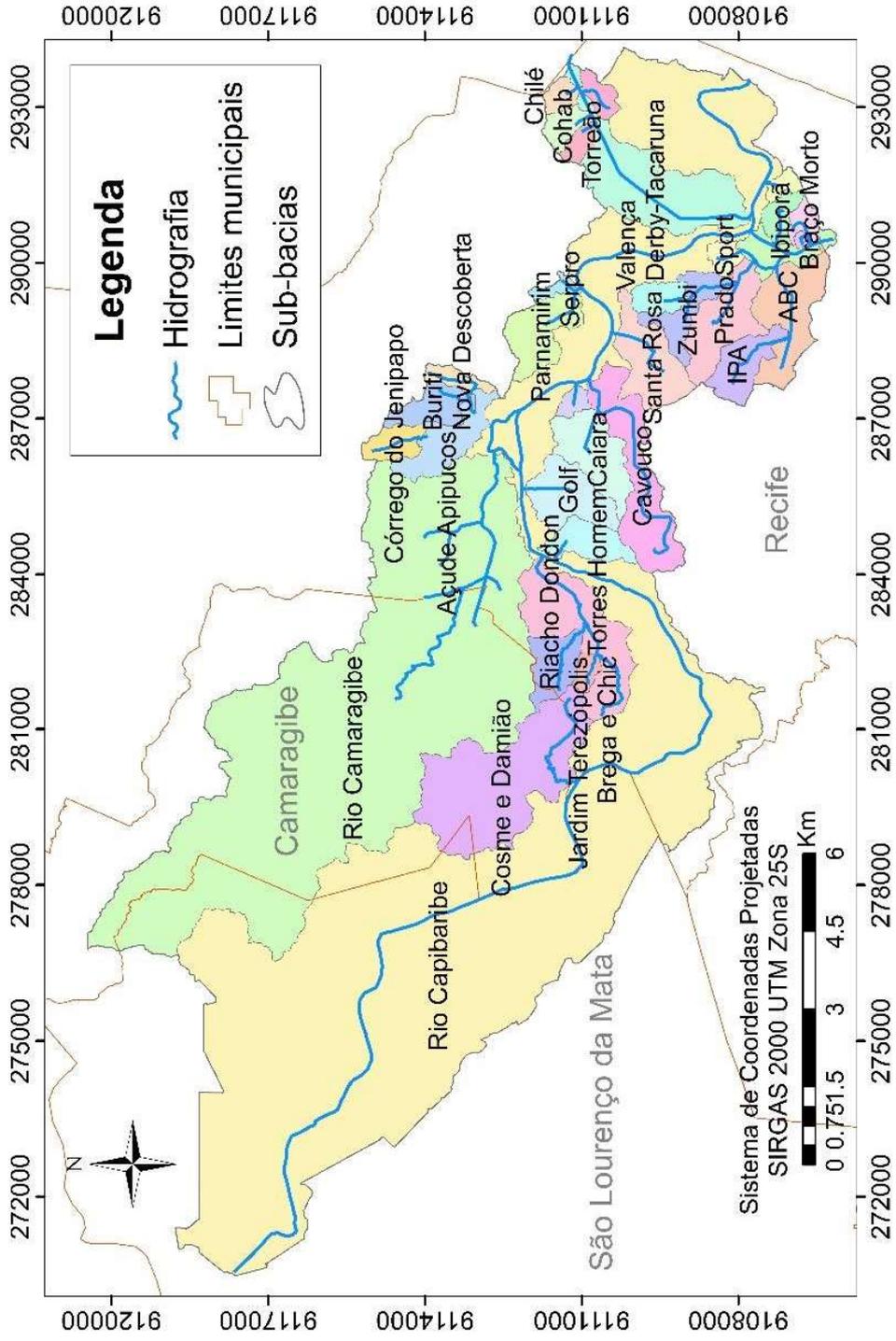
Já para reconstrução da enchente de 1975, foram considerados os dados de precipitação registrados pelo pluviógrafo da estação meteorológica do Curado, que atualmente corresponde à estação PEA301 do INMET, e estimativas de vazão horária no posto fluviométrico de São Lourenço da Mata, visto que, para a data do evento, só há registros de vazão diária. Ambos os dados foram obtidos do trabalho de Alcoforado (2006).

3.3.3 Definição da rede de drenagem e bacias contribuintes

O rio Capibaribe ao longo da sua extensão apresenta afluentes em forma de canais, rios e riachos, sendo assim, cabe considerar esse aporte lateral na modelagem hidrológica. Portanto, é necessária a definição da rede de drenagem e das suas bacias contribuintes.

A discretização da bacia do Capibaribe em sub-bacias foi realizada através do *software* QGIS e seus complementos, tendo como dado de entrada o MDT do PE3D. As extensões constituem um conjunto de ferramentas de análise hidrológicas geoespaciais que, através das informações extraídas do MDT, permitem a delimitação da hidrografia e de suas respectivas bacias, bem como sua caracterização morfométrica, tais como declividade das bacias, centro de massa das bacias, comprimento do talvegue, declividade e comprimento dos cursos d'água, etc. Essas informações são utilizadas para a estimativa de parâmetros do modelo hidrológico. A Figura 12 apresenta as sub-bacias geradas para todos os canais, riachos e rios em estudo.

Figura 12 - Sub-bacias dos canais e riachos integrantes da bacia do Capibaribe.



Fonte: A autora (2019)

Para cada sub-bacia, foram determinados o comprimento da drenagem principal e sua respectiva declividade. O comprimento da drenagem principal, atributo comumente designado *longest flow path* (mais longo caminho de fluxo) pelos *softwares* de geoprocessamento, corresponde ao caminho mais longo que a água pode percorrer dentro da bacia. Ambos os atributos foram utilizados para a determinação do tempo de concentração de cada sub-bacia.

O tempo de concentração foi calculado a partir de equações empíricas, considerando as sugestões de Silveira (2005), o qual avaliou o desempenho de diversas fórmulas de tempo de concentração para bacias urbanas e rurais. Para as sub-bacias com área maior que 11 km², foi aplicada a equação de kirpich, apresentada abaixo.

$$t_c = 0,0663L^{0,77}S^{0,385} \quad (7)$$

onde t_c é o tempo de concentração em horas, L é o comprimento da drenagem principal em km e S é a sua respectiva declividade em m/m.

Já para as demais sub-bacias, o tempo de concentração foi calculado através da equação de Carter:

$$t_c = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3} \quad (8)$$

onde t_c é o tempo de concentração em horas; L é o comprimento da drenagem principal em em km; S é a sua respectiva declividade em m/m.

A Tabela 7 reúne as principais características das bacias contribuintes do rio Capibaribe, as quais foram utilizadas como dados de entrada do modelo hidrológico.

Tabela 7 - Principais características das bacias contribuintes do rio Capibaribe.

Bacia	Características			
	Área (km ²)	Longest flow path (m)	Declividade (m/m)	Tempo de concentração (min)
Canal do Buriti	0,878	2272,93	0,035636858	26,09
Canal do Córrego do Jenipapo	0,640	1709,88	0,047371835	20,19
Canal Nova Descoberta	0,383	1840,22	0,038582	22,44
Rio Camaragibe	35,355	17367,61	0,007370039	237,96
Açude de Apipucos	1,353	2414,57	0,036445467	26,87
Riacho Dondon	3,096	5245,17	0,016396041	54,39
Canal do Serpro	0,224	1402,46	0,009269436	29,25
Canal Cosme e Damião	5,736	5556,98	0,016375811	56,32
Canal Jardim Terezópolis	1,084	2909,87	0,032991121	30,96
Canal do Chile	0,340	1036,37	0,00289471	34,58
Canal do Parnamirim	1,504	2609,56	0,013795418	37,68
Canal do Golf	1,583	2436,53	0,004514625	50,55
Canal Derby-Tacaruna	3,907	6185,11	0,001940142	113,89
Canal São Mateus	0,263	1028,72	0,006804604	26,64
Canal do Torreão	0,325	1271,51	0,003145863	38,13
Canal da Cohab	0,464	1324,11	0,00377612	36,99
Canal do Caiara	1,685	2772,66	0,002885312	62,48
Canal Brega e Chic	0,289	1057,20	0,073779682	13,25
Canal Torres Homem	0,955	2081,80	0,005283882	43,88
Canal Santa Terezinha	0,412	1151,35	0,000173709	85,67
Canal do Cavouco	2,838	6155,47	0,00178703	116,40
Canal Santa Rosa	1,822	2838,58	0,002818311	63,81
Canal do Valença	0,580	1553,46	0,003218616	42,71
Canal do Zumbi	1,017	2791,51	0,001791146	72,38
Canal do Prado	1,815	3372,48	0,002075626	77,57
Canal do Sport	0,334	1030,92	0,002910009	34,42
Braço Morto	0,860	2699,29	0,002222807	66,49
Canal do IPA	1,125	2483,32	0,002416121	61,68
Canal Joana Bezerra	0,255	1023,82	0,002930209	34,21
Canal da rua Ibiporã	0,502	1469,90	0,002721271	43,45
Canal do ABC	2,109	3057,86	0,002289186	71,02
Canal Fernandinho	0,354	1179,86	0,00339022	35,65
Canal Travessa Realeza	0,063	460,18	0,004346104	18,81

Fonte: A autora (2019)

3.3.4 Classificação do uso e ocupação do solo

O processo de transformação de precipitação em escoamento superficial depende, além das características morfométricas da bacia hidrográfica, do grau de impermeabilização do solo. Sendo assim, foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica em estudo, a qual serviu como parâmetro de entrada para a modelagem hidrológica.

Para a classificação do uso e ocupação do solo foram utilizados como os produtos do programa PE3D, os quais incluíram ortofotos aéreas com resolução espacial de 8 cm e Modelo Digital do Terreno e Modelo Digital de Elevação com resolução espacial original de 50 cm, reamostrados para 8 cm a fim de deixá-los compatíveis com a resolução das ortofotos. Todos os produtos do PE3D utilizados foram levantados em 2014.

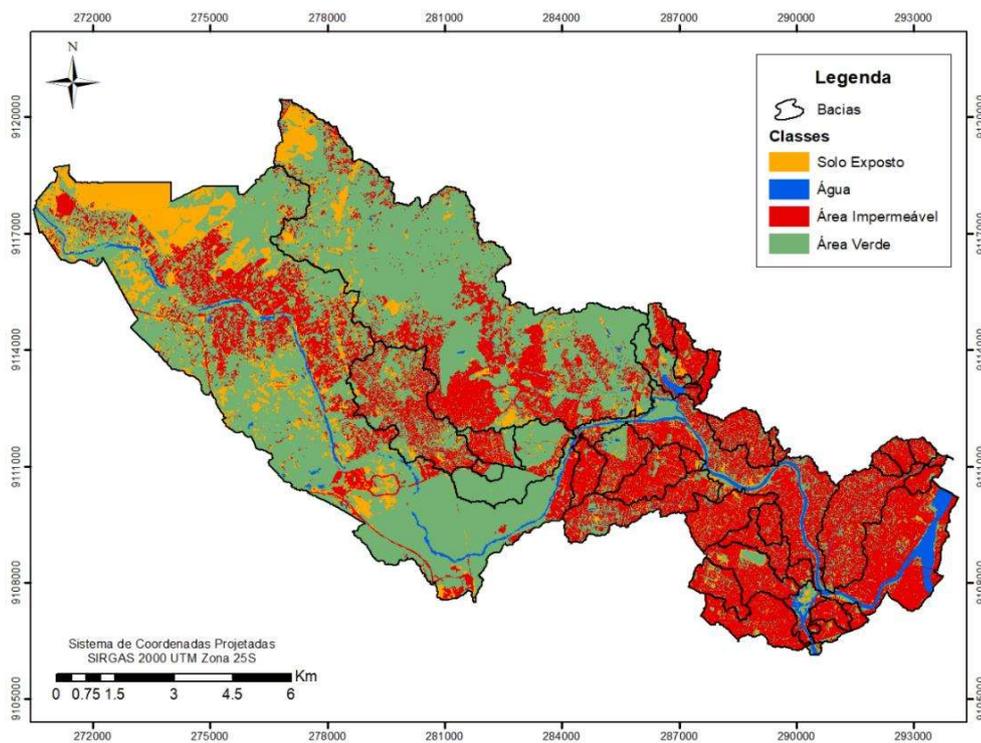
Para a classificação foram consideradas quatro categorias de uso e ocupação do solo: solo exposto (laranja), área verde (verde), área impermeável (vermelho) e água (azul). Os resultados obtidos para as classes consideradas na classificação das bacias contribuintes do rio Capibaribe estão dispostos na Tabela 8 e Figura 13 a seguir. Na Figura 14, por sua vez, são apresentados detalhes do mapa de classificação de uso do solo sobre a ortofoto do PE3D.

Tabela 8 – Percentual das áreas de cada classe por bacia hidrográfica.

Bacia	% solo exposto	% água	% área impermeável	% área verde
Canal do ABC	1,91	0,26	88,79	9,04
Canal Torres Homem	2,04	0,22	84,35	13,38
Açude de Apipucos	3,2	9,38	32,49	54,93
Rio Camaragibe	8,98	0,34	22,37	68,3
Braço Morto	10,36	28,1	33,76	27,78
Canal Brega e Chic	2,47	0,04	33,37	64,12
Canal do Buriti	5,12	0,16	80,91	13,8
Canal do Caiara	2,74	0,04	79,93	17,29
Rio Capibaribe	15,57	4,41	27,62	52,4
Canal do Cavouco	3,78	0,95	63,18	32,08
Canal do Chile	1,78	0,02	79,22	18,97
Canal da Cohab	0,04	0,09	84,69	14,82
Canal Cosme e Damião	7,03	0,16	42,39	50,42
Canal Derby-Tacaruna	1,95	1,42	73,04	23,59
Riacho Dondon	3,94	0,09	9,61	86,36
Canal Fernandinho	4,27	0,44	74,08	21,21
Canal do Golf	5,78	1,26	53,42	39,54
Canal do IPA	4,22	0,22	78,16	17,4
Canal Jardim Terezópolis	5,53	0,12	55,12	39,24
Canal do Córrego Jenipapo	4,57	0,11	60,01	35,32
Canal Joana Bezerra	3,36	1,33	82,17	13,14
Canal Nova Descoberta	0,04	0,2	95,31	4,45
Canal do Parnamirim	0,52	0,09	74,12	25,27
Canal do Prado	4,93	0,32	72,67	22,08
Canal Santa Rosa	4,13	0,22	79,62	16,03
Canal Santa Terezinha	2,56	0,7	85,41	11,33
Canal São Mateus	10,41	0,69	70,32	18,58
Canal do Serpro	3,37	0,76	69,99	25,87
Canal do Sport	2,09	0,24	76,1	21,56
Canal do Torreão	1,74	0,03	79,06	19,17
Canal Travessa Realeza	3,06	0,54	75,71	20,69
Canal do Valença	1,21	0,06	82,28	16,45
Canal do Zumbi	0,79	0,24	82,88	16,09
Canal da rua Ibiporã	3,65	1,01	85,99	9,36

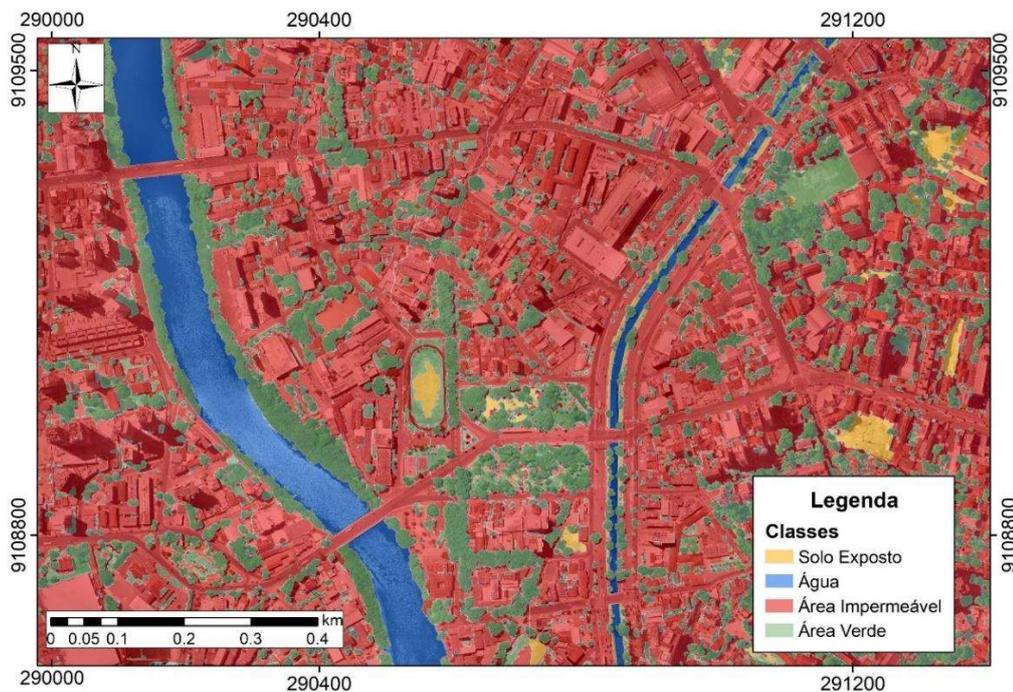
Fonte: A autora (2019)

Figura 13 - Mapa de classificação de uso e ocupação do solo da área de estudo.



Fonte: A autora (2019)

Figura 14 - Detalhes da classificação do uso do solo sobre ortofoto do PE3D.



Fonte: A autora (2019)

3.3.5 Marés

A variação da amplitude das marés exerce grande influência na rede hidrográfica da cidade, resultando na variação do sentido do escoamento ao longo do dia e até provocando alagamentos em pontos da cidade, mesmo na ausência de eventos de precipitação (SILVA, 2010). Desse modo, é fundamental considerar esse fator na modelagem hidrodinâmica.

Na faixa litorânea da RMR a maré é do tipo semidura, a qual é caracterizada pela ocorrência de duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar (24 horas e 20 minutos em média) e cujas alturas de duas preamares ou de duas baixa-mares sucessivas são praticamente iguais.

A distância vertical entre uma preamar e uma baixa-mar consecutiva é denominada de amplitude da maré, que varia regularmente conforme a posição relativa da Lua e do Sol. Quando a Lua, a Terra e o Sol estão alinhados ocorrem as luas cheia e nova, período no qual os efeitos das marés são somados, gerando as maiores marés altas e as menores marés baixas, as quais são denominadas de marés de sizígia (marés de águas vivas).

Já nos quartos crescente e minguante da Lua, os três astros estão arrançados de tal modo que formam entre si um ângulo de 90° . Nessa configuração, os efeitos das marés são reduzidos, resultando nas mínimas amplitudes. As marés que ocorrem nesse período são chamadas de marés de quadraturas (marés de águas mortas). As amplitudes das marés são variáveis, sendo que as marés de sizígia produzidas nos equinócios (fins de março e setembro) possuem as maiores amplitudes do ano.

Os dados de elevação da maré são divulgados pela Marinha do Brasil através da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Esses dados são disponibilizados por meio de tábuas onde são apresentados os valores de máximos e de mínimos da altura das marés.

A obtenção dos valores intermediários da altura da maré foi realizada através do processo de interpolação hermitiana, assumindo a hipótese de que a curva da maré astronômica no local varia de modo aproximado a uma função cúbica. Espindola

(2012) utilizou esse método para a interpolação temporal dos dados das tábuas de marés de diversos portos da região litorânea do Nordeste, inclusive do Porto do Recife, e constatou que essa abordagem fornece resultados bastantes satisfatórios quando comparado aos dados fornecidos pelo SisBaHiA®, *software* que realiza previsões através das constantes harmônicas do local. Além disso, esse método matemático foi testado com sucesso no cálculo das alturas de maré quando comparado às medidas realizadas diretamente em campo (GOPALAKRISHNAN; RAA, 1986).

A interpolação hermitiana usa o valor da variável η (altura da maré) e de seus gradientes locais $\eta' = \partial\eta/\partial t$ em valores fornecidos da variável independente t (tempo). Sua representação é dada pela Equação 9:

$$\eta = N_1\eta_1 + N_2\eta_1' + N_3\eta_2 + N_4\eta_2' \quad (9)$$

onde N_1 , N_2 , N_3 e N_4 são as funções de interpolação cúbica hermitiana, fornecidas por:

$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{t}{T}\right)^2 + 2\left(\frac{t}{T}\right)^3 \quad (10)$$

$$N_2 = t + T\left[\left(\frac{t}{T}\right)^3 - 2\left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \quad (11)$$

$$N_3 = 3\left(\frac{t}{T}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{T}\right)^3 \quad (12)$$

$$N_4 = t + T\left[\left(\frac{t}{T}\right)^3 - 2\left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \quad (13)$$

onde η_1 e η_2 são os valores das elevações da maré alta e baixa em um intervalo de tempo T , e η_1' e η_2' são os gradientes de η . Como η_1 e η_2 são pontos de inflexão, os gradientes η_1' e η_2' são iguais a zero, e a Equação 9 torna-se:

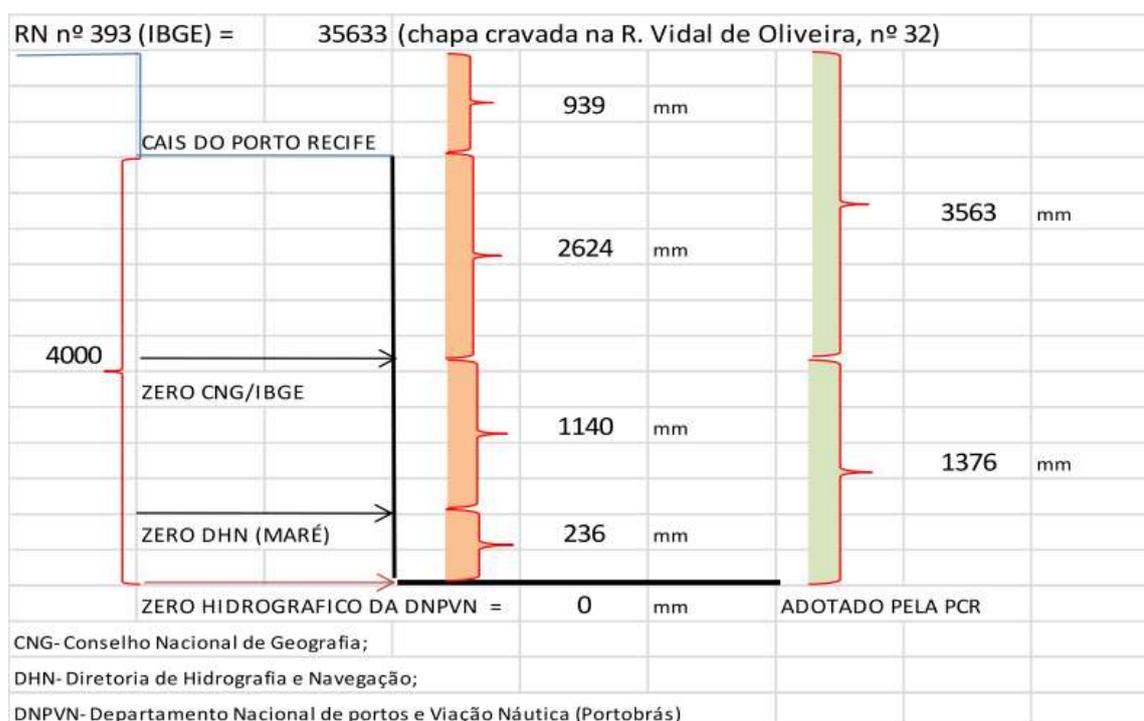
$$\eta = N_1\eta_1 + N_3\eta_2 \quad (14)$$

Assim, a partir da equação 14, para um dado instante, é calculada a elevação da maré.

Objetivando-se a automatização desse cálculo, foi desenvolvida uma rotina, em linguagem Python 3.6.4, de previsão de maré a partir da implementação das equações (10), (12) e (14). O código desse procedimento pode ser visto no Apêndice A.

As cotas das marés são calculadas em relação ao zero hidrográfico da Marinha, o qual apresenta uma diferença de 1,14m em relação ao zero do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), conforme representado na Figura 15.

Figura 15 - Exemplo esquemático da correlação dos níveis no Porto do Recife.



Fonte: Silva (2011)

Sendo assim, é necessário corrigir os dados fornecidos pelas tábuas de marés do DHN, correlacionando-os com o zero do IBGE a fim de haver correta aplicação no modelo. Essa correção é feita da seguinte maneira:

$$\text{Cota da maré corrigida (IBGE)} = \text{cota da maré do DHN} - 1,14\text{m}$$

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica foi realizada através do HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), que é um *software* desenvolvido e distribuído gratuitamente pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, com a finalidade de modelar o processo chuva-vazão em bacias hidrográficas dendríticas.

O HEC-HMS foi escolhido por ser um *software* de domínio público, por possuir uma interface de comunicação com *softwares* de geoprocessamento e pela sua ampla aplicação em estudos hidrológicos (MORAES *et al.*, 2018; SANTOS, 2017; ALFY, 2016; SABÓIA *et al.*, 2017; HALWATURA; NAJIM, 2013; MOREIRA, 2013).

O HEC-HMS compreende diversos modelos matemáticos, permitindo que os processos hidrológicos sejam modelados através de diferentes métodos a depender da finalidade do estudo, das características da bacia e da disponibilidade de dados.

Além disso, permite realizar simulações de eventos ou simulações contínuas de longo período, e divide a bacia hidrográfica em um conjunto interligado de sub-bacias, onde os processos hidrológicos são representados por parâmetros que refletem as suas condições médias, possibilitando a modelagem com uma abordagem distribuída por sub-bacias.

O HEC-HMS é constituído por quatro componentes fundamentais: **dados de séries temporais**, **modelo de bacia**, **modelo meteorológico** e **especificações de controle** (FELDMAN, 2000). O componente **dados de séries temporais** compreende a entrada de dados de precipitação, necessários para a estimativa da precipitação média da bacia, e dados observados de vazão, utilizados na calibração do modelo. O **modelo meteorológico** é responsável pela preparação das condições meteorológicas de contorno atuantes na bacia hidrográfica durante a simulação. O componente **especificações de controle** refere-se ao período de simulação e ao intervalo de tempo de computação dos dados.

O **modelo de bacia** compreende a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica e a representação do seu esquema hidrológico, o qual é constituído por

trechos dos cursos d'água, junções e desvios da drenagem, sub-bacias e possíveis reservatórios. Nesta etapa são definidos os métodos de cálculo dos processos hidrológicos e seus parâmetros. É considerado o componente mais importante por ser o responsável pela conversão das condições atmosféricas em escoamento superficial.

3.4.1 Métodos para simulação do processo chuva-vazão

A fração da precipitação que infiltra no solo e não contribui diretamente para o escoamento superficial é determinada através do método de perda (*Loss method*). O HEC-HMS dispõe de doze diferentes métodos para o cálculo de perda.

O método utilizado no presente estudo foi o da Curva Número, desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service – SCS*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*). Nesse método, a capacidade máxima de armazenamento de água na camada superior do solo S é calculada em função do parâmetro CN (curva número), conforme mostra a Equação 15:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (15)$$

O CN retrata as condições de cobertura e 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, 2005b). O valor do CN foi estimado através da Tabela 9, de acordo com as informações obtidas do mapeamento do uso e ocupação do solo e do tipo de solo da região. Os valores estimados de CN , para cada bacia hidrográfica, estão dispostas na Tabela 10.

Tabela 9 – Valores médios dos parâmetros CN para diferentes tipos de ocupação urbana.

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)					
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93	
Áreas residenciais					
tamanho do lote (m ²)	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	
Arruamentos e estradas:					
Asfaltadas e com drenagem pluvial	98	98	98	98	
Paralelepípedos	76	85	89	91	
Terra	72	82	87	89	

Fonte: Tucci (2005b)

Os tipos de solos identificados na tabela são os seguintes (TUCCI, 2005b):

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;

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

Tabela 10 - Valores de CN estimados para as bacias contribuintes do rio Capibaribe.

Bacia	CN	Bacia	CN
Canal do ABC	96,17	Canal do IPA	94,41
Canal Torres Homem	95,37	Canal Jardim Terezópolis	90,33
Açude de Apipucos	87,95	Canal do Córrego do Jenipapo	91,14
Rio Camaragibe	84,68	Canal Joana Bezerra	95,29
Braço Morto	92,42	Canal Nova Descoberta	97,20
Canal Brega e Chic	86,19	Canal do Parnamirim	93,40
Canal do Buriti	94,95	Canal do Prado	93,49
Canal do Caiara	94,59	Canal Santa Rosa	94,66
Rio Capibaribe	86,94	Canal Santa Terezinha	95,69
Canal do Cavouco	91,83	Canal São Mateus	93,53
Canal do Chile	94,39	Canal do Serpro	92,99
Canal da Cohab	95,29	Canal do Sport	93,89
Canal Cosme e Damião	88,15	Canal do Zumbi	95,02
Canal Derby-Tacaruna	93,57	Canal do Valença	94,91
Riacho Dondon	82,02	Canal do Torreão	94,36
Canal Fernandinho	93,72	Canal Travessa Realeza	93,95
Canal do Golf	90,27	Canal da rua Ibiporã	95,93

Fonte: A autora (2019)

A capacidade de armazenamento S é utilizada para estimar as perdas iniciais I_a na bacia. As perdas iniciais definem o volume de precipitação necessário para haver escoamento superficial. O valor de I_a é estimado, para condições médias, pela seguinte relação:

$$I_a = 0,2S \quad (16)$$

Se volume precipitado for inferior às perdas iniciais, não haverá formação de escoamento superficial. Já para os casos em que o volume precipitado é superior às perdas iniciais, a precipitação excedente é determinada através da Equação 17:

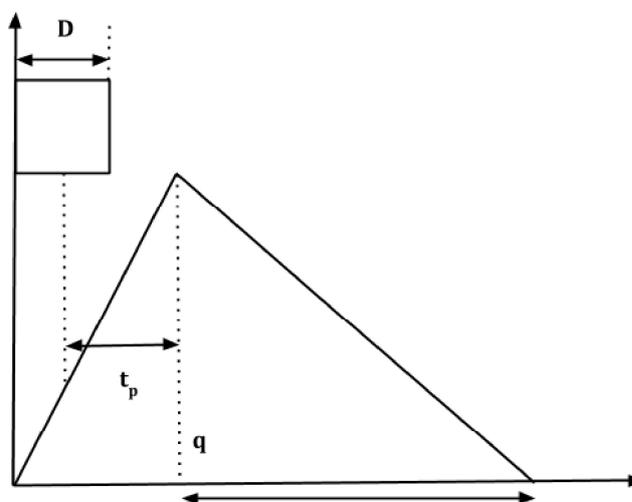
$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad (17)$$

onde P_e é o volume superficial acumulado em mm; P é a precipitação total acumulada em mm.

O método de transformação (*Transform method*) avalia o excedente de precipitação que se tornará escoamento superficial. O HEC-HMS possui oito métodos para o cálculo da transformação da precipitação excedente em vazão, dentre os quais foi escolhido o método do hidrograma unitário do SCS.

Nesse método, o volume gerado pela separação do escoamento é propagado até o curso d'água através do uso do hidrograma unitário sintético triangular (Figura 16), obtido com base no valor da vazão máxima q e do tempo de pico t_p .

Figura 16 - Hidrograma unitário retangular do SCS.



Fonte: A autora (2019)

O tempo de pico é definido como o intervalo de tempo entre o centro de gravidade do hidrograma e o instante em que a vazão atinge seu valor máximo, correspondendo à 60% do tempo de concentração da bacia hidrográfica. Sendo assim, esse parâmetro foi estimado com base nos valores obtidos através das Equações 7 e 8.

A vazão máxima, por sua vez, é calculada por meio da Equação 18:

$$q = \frac{2,08A}{\frac{D}{2} + t_p} \quad (18)$$

onde A é a área da bacia hidrográfica em km^2 ; q é a vazão de pico em m^3/s ; t_p é o tempo de pico em horas; D é o intervalo de tempo em horas.

O cálculo da propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem da bacia hidrográfica é realizado a partir do método de propagação (*Routing method*). O HEC-HMS apresenta oito diferentes métodos para o cálculo da propagação da vazão na bacia, dentre os quais foi escolhido o método Muskingum-Cunge.

O método Muskingum-Cunge é baseado na combinação dos princípios da conservação de massa e conservação do momento, de modo que a propagação da onda de cheia no canal é função do efeito do armazenamento e dos efeitos das forças dinâmicas atuantes no escoamento.

Nesse método, o tempo de deslocamento da onda de cheia no canal e a vazão no exutório de cada sub-bacia são estimados a partir das características físicas do canal principal, conforme descrito nas Equações 19 e 20. Os atributos físicos dos canais foram extraídos do MDT, na etapa de delimitação da rede de drenagem e das bacias contribuintes.

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (19)$$

onde K é o tempo de deslocamento da onda de cheia no canal em segundos; Δx é a extensão do trecho do canal em m; c é a celeridade da propagação da onda de cheia em m/s.

$$X = 0,5 \left(1 - \frac{Q}{B \cdot c \cdot S \cdot \Delta x} \right) \quad (20)$$

onde X é o fator de ponderação ($0 \leq X \leq 0,5$); Q é a vazão no exutório em m^3/s ; B é a largura média do canal em m; c é a celeridade da propagação da onda de cheia em

m/s; S é a declividade média do trecho em m/m; Δx é a extensão do trecho do canal em m.

Para o evento de 2011, o período de simulação foi de 01 a 05 de maio. Já o período de simulação do evento de 1975 compreendeu os dias 17 e 18 de julho. Em ambas simulações, o intervalo de tempo adotado foi de 1 hora.

3.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada através do HEC-RAS 5.0.7 (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), *software* de domínio público desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, que tem como finalidade realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para rede de rios e canais naturais e artificiais (USACE, 2016). Esse *software* permite a simulação de escoamentos permanente e não-permanente, nos regimes crítico, subcrítico e misto, além da simulação do transporte de sedimentos e da qualidade da água. O HEC-RAS foi escolhido para a realização da modelagem hidrodinâmica pelos mesmos motivos apresentados para o HEC-HMS.

A simulação de escoamentos em regime permanente se baseia na solução unidimensional da equação de energia de Bernoulli, sendo as perdas de energia devido ao atrito avaliadas através da declividade da linha de energia, a qual é computada a partir da equação de Manning. Em situações na quais o nível de água rapidamente varia, tais como na transição de um regime subcrítico para supercrítico e vice-versa, a equação do momento é aplicada.

A simulação de escoamentos não-permanentes unidimensionais se baseia na solução da equação completa de Saint-Venant através do método das diferenças finitas. Já para modelos bidimensionais, o *software* possui duas abordagens, a critério do usuário: a solução da equação completa de Saint-Venant ou da equação da onda de difusão. Em ambas as abordagens, a solução das equações 2D é realizada através do método do volume finito implícito.

De acordo com Tucci (2005b), a aplicação de modelos unidimensionais não é apropriada para regiões estuarinas devido à simplificação de que o escoamento é preponderantemente longitudinal, sendo, portanto, mais adequado utilizar modelos bidimensionais. Considerando que a área de estudo compreende o estuário do rio Capibaribe, a condição estabelecida para a modelagem hidrodinâmica foi a de escoamento não-permanente bidimensional com solução através da equação completa de Saint-Venant.

Como dados de entrada do modelo foram utilizados o MDT da área de estudo, os dados de maré interpolados a cada 10 minutos, as vazões registradas no posto fluviométrico de São Lourenço e as vazões horárias obtidas a partir da simulação com o HEC-HMS. Também foram utilizados os hidrogramas estimados no estudo de Gomes (2019), os quais compreendem as vazões descarregadas no posto de São Lourenço sob os cenários de ausência do sistema de contenção de cheia, para o evento de 2011, e existência sistema de contenção para o evento de 1975.

Os dados de vazão observados na estação e as vazões simuladas por Gomes (2019) constituíram as condições de contorno de montante do sistema. Os dados de maré representaram as condições de contorno de jusante do sistema. E as vazões fornecidas pela modelagem hidrológica no HEC-HMS, por sua vez, constituíram as condições de contorno internas do sistema.

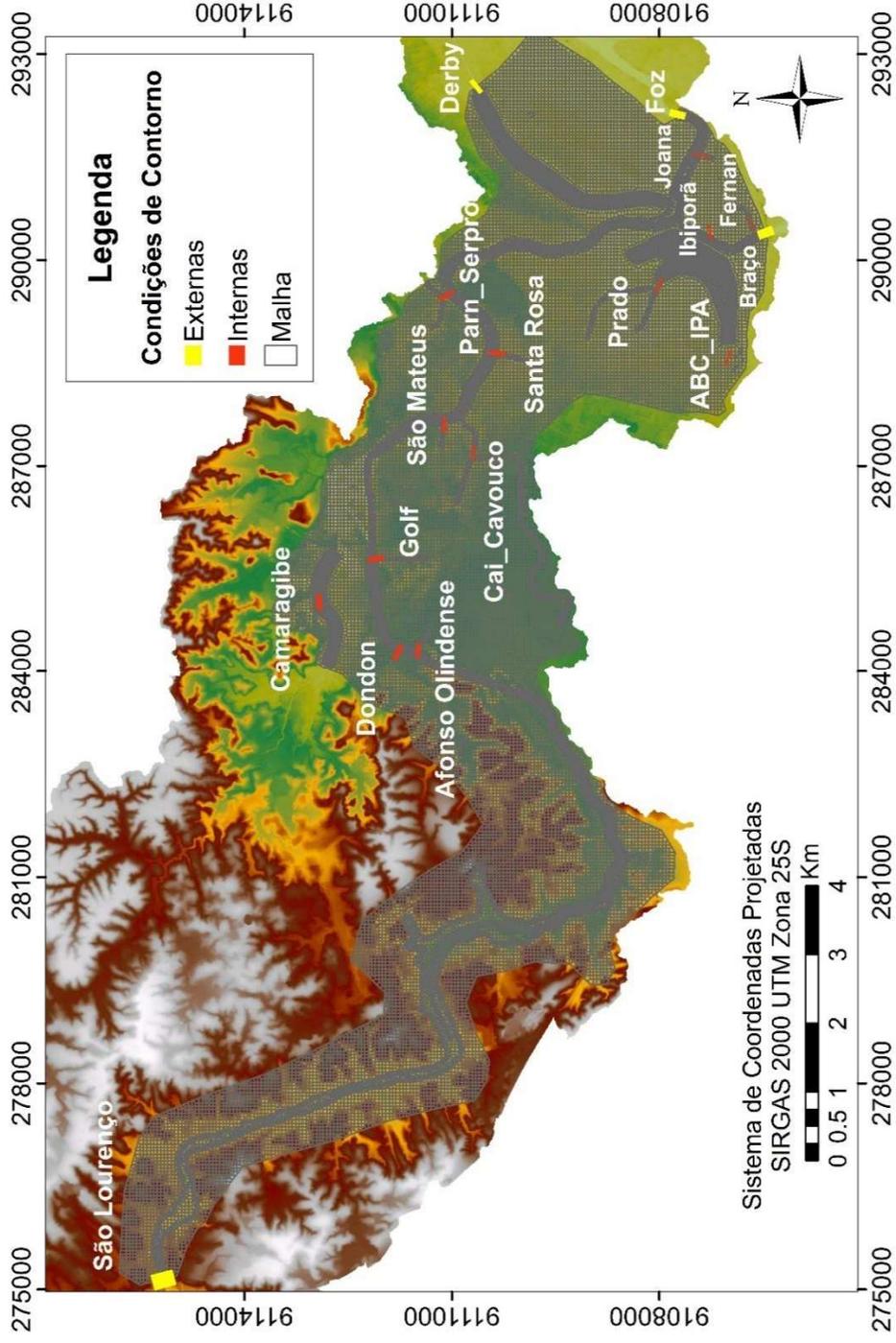
Na modelagem 2D no HEC-RAS, a superfície da área de estudo é representada por células interconectadas formando uma malha bidimensional no plano horizontal, sobre a qual são efetuados os cálculos. Sendo assim, foi gerada sobre o MDT uma malha regular de células quadradas com dimensões de 50m x 50m. Nas regiões de interesse, tais como sobre o rio Capibaribe e canais, foi realizado um refinamento da malha através do uso de linhas de quebra (*breaklines*) e redução das dimensões das células, com o intuito tanto de orientar o escoamento quanto aumentar a precisão do modelo. As dimensões das células nas áreas refinadas variaram entre 10m x 10m e 30m x 30m, a depender do tamanho da estrutura avaliada. A Figura 17 mostra a malha bidimensional gerada sobre o MDT da área de estudo e a localização das condições de contorno do sistema.

Para a execução da simulação hidrodinâmica também foi necessária fazer a readequação do MDT por meio da inserção da batimetria da calha do rio Capibaribe. Esta etapa foi realizada com a finalidade de aprimorar o modelo com informações mais precisas, uma vez que os sensores utilizados no perfilamento a laser do PE3D não fornecem informações abaixo da superfície da água.

A batimetria utilizada foi proveniente do projeto de Navegabilidade do rio Capibaribe, abrangendo a extensão do rio Capibaribe da altura da BR 101 até à ponte 6 de Março. Na Figura 18 podem ser visualizados os detalhes da malha bidimensional, bem como o trecho do rio Capibaribe onde foi inserida a batimetria.

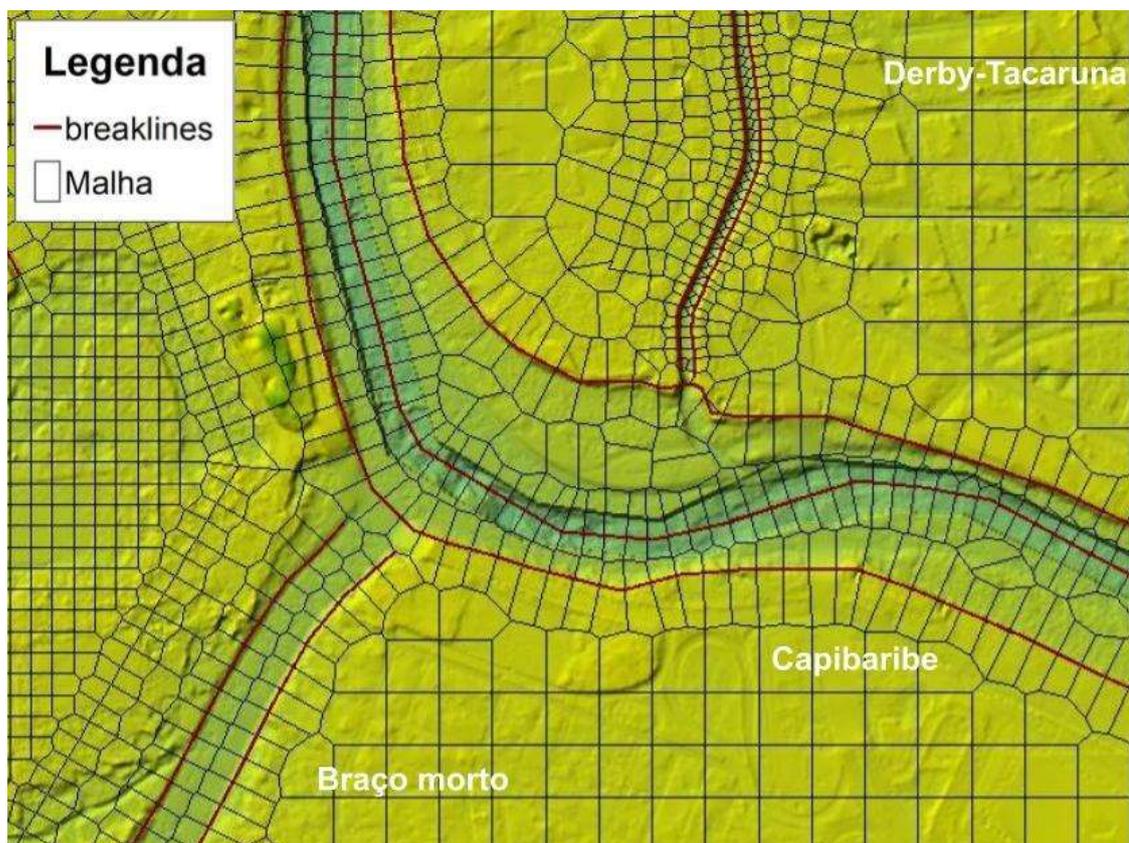
Os períodos escolhidos para simulação foram de 5 a 7 de maio de 2011, para avaliação da enchente de 2011, e de 17 a 20 de julho de 1975, para a enchente de 1975. O coeficiente de Manning utilizado foi de 0,035, conforme estimado por Barros (1979) e Alcoforado e Cirilo (2001) para o rio Capibaribe. O intervalo computacional utilizado para as simulações foi de 1 minuto, enquanto que os resultados foram fornecidos em intervalos de 2 minutos.

Figura 17 – Localização da malha de simulação 2D sobre MDT da área de estudo.



Fonte: A autora (2019)

Figura 18 - Detalhes da malha de células utilizada na simulação hidrodinâmica.



Fonte: A autora (2019)

3.6 EVENTOS SIMULADOS

Para avaliação da ocorrência de inundações no Recife e da influência do sistema de contenção de cheia da bacia do rio Capibaribe, foram escolhidas as enchentes de 1975 e de 2011, as quais são descritas nesta seção.

3.6.1 Enchente de 1975

Em julho de 1975, chuvas intensas caíram sobre o médio Capibaribe, gerando um volume de escoamento superficial tal que resultou em um aumento de mais de 8 m acima do nível normal do rio Capibaribe, atingindo uma vazão de pico estimada em

torno de 3.000 m³/s (GÓES, 2009) e provocando inundação de grande magnitude entre os dias 17 e 18 de julho no Recife. As Figuras 19 e 20 apresentam algumas imagens de pontos inundados.

Esse evento é considerado a maior inundação ocorrida no Recife, deixando mais de 31 bairros inundados, o que compreende 80% da área do município. Ainda, 40% dos postos de gasolina ficaram submersos, quase todos os hospitais recifenses ficaram inundados e o sistema de energia elétrica foi cortado em 70% da área do município. Por terra, o Recife ficou isolado do resto do País durante dois dias. Outros 25 municípios da bacia do Capibaribe também foram atingidos. No total, 107 pessoas morreram e outras 350 mil ficaram desabrigadas. A Figura 21 apresenta o hietograma relativo ao período crítico da enchente.

Figura 19 - Bairro do Arruda inundado pela cheia de 1975.



Fonte: Jornal Diário de Pernambuco²

²Disponível em: <http://blogs.diariodepernambuco.com.br/esportes/2015/07/21/arruda-afritos-e-ilha-do-retiro-inundados-na-cheia-de-1975-no-susto-de-tapacura/>. Acesso em: 22 jun. 2019

Figura 20 - Bairro Ilha do Retiro inundado pela cheia de 1975.

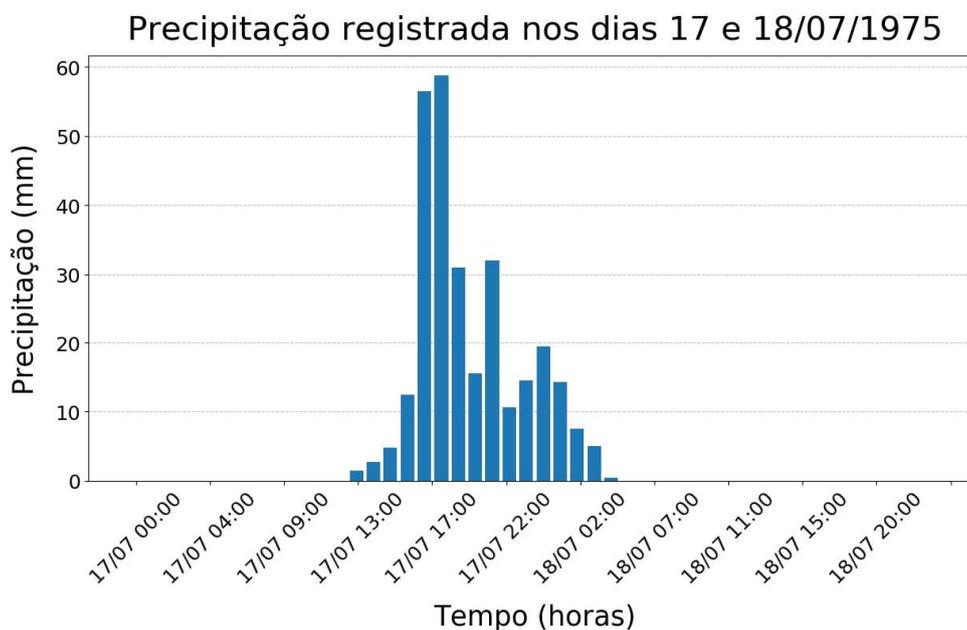


Fonte: Jornal Diário de Pernambuco³

Nessa época, a única barragem existente a montante do Recife era a de Tapacurá, que apenas regula a vazão do rio de mesmo nome, portanto não absorvendo a vazão produzida no médio Capibaribe. Após essa catástrofe, novas medidas de controle foram implementadas: a construção da barragem de Carpina, destinada ao controle de enchentes, retificação da calha na área urbana (alargamento e ampliação do vão das pontes do Derby e Torre) e também a construção de barragem de contenção no rio Goitá.

³Disponível em: <http://blogs.diariodepernambuco.com.br/esportes/2015/07/21/arruda-aflitos-e-ilha-do-retiro-inundados-na-cheia-de-1975-no-susto-de-tapacura/>. Acesso em: 22 jun. 2019

Figura 21 - Registro da precipitação durante o período crítico da enchente.



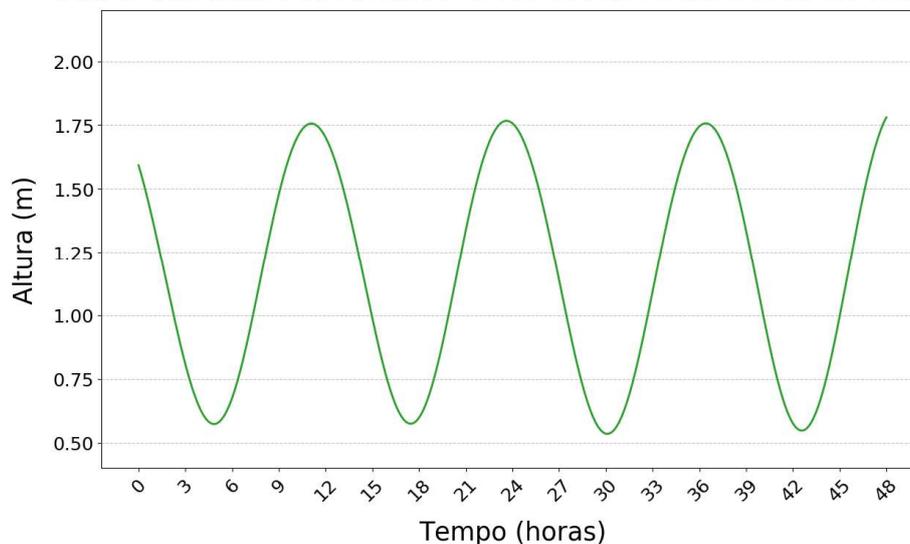
Fonte: A autora (2019)

Para a reprodução desse evento, além dos dados hidrológicos obtidos através do estudo de Alcoforado (2006), também foram utilizados dados de maré dos dias 17/07/1975 e 18/07/1975, estimados através do *software* SisBaHiA[®], o qual é um sistema profissional de modelos computacionais gratuito registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ.

O SisBaHiA[®] apresenta diversos módulos: modelo hidrodinâmico, modelo de transporte Euleriano, modelo de propagação de ondas e o módulo de análise e previsão de marés. Através do módulo de previsão de marés, fornecendo-se as constantes harmônicas, é possível gerar a altura da maré em um tempo futuro ou passado. O maregrama dos dias 17/07/1975 e 18/07/1975 para o Porto do Recife está apresentando na Figura 22.

Figura 22 - Maregrama dos dias 17/07/1975 e 18/07/1975 no Porto do Recife.

Maré dos dias 17/07/1975 e 18/07/1975 no Porto do Recife



Fonte: A autora (2019)

Nesse estudo, além do evento de 1975, também foram simulados outros cenários: um considerando a existência do sistema de contenção de cheia e outro considerando as projeções de aumento do nível dos mares elaboradas pelo IPCC. O hidrograma para o cenário de existência de sistema de contenção de cheia na bacia do Capibaribe foi obtido do estudo de Gomes (2019).

3.6.2 Enchente de 2011

No início do mês de maio de 2011, fortes chuvas caíram sobre o médio Capibaribe, resultando no vertimento das barragens de Tapacurá, Jucazinho e Goitá e no acúmulo de água correspondente a quase 80% da capacidade de armazenamento da barragem de Carpina.

Esses reservatórios são considerados de grande porte e elevada relevância para o médio/baixo Capibaribe e RMR por estarem estrategicamente localizados onde podem atuar como controle de enchentes. A Figura 23 apresenta um esquema das principais barragens para a contenção de cheias da bacia do rio Capibaribe.

Figura 23 - Sistema de contenção de cheia da bacia do Capibaribe.



Fonte: A autora (2019)

As previsões meteorológicas apontavam para uma provável ocorrência de evento chuvoso de grande magnitude, o que poderia levar a barragem de Carpina ao vertimento. Caso a barragem de Carpina vertesse, não seria possível controlar o volume de água despejado na calha do rio Capibaribe, podendo o pico de vazão ultrapassar $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, o que, com o acréscimo das áreas contribuintes a jusante, provocaria inundações similares às ocorridas na década de 1970 (CIRILO *et al.*, 2011).

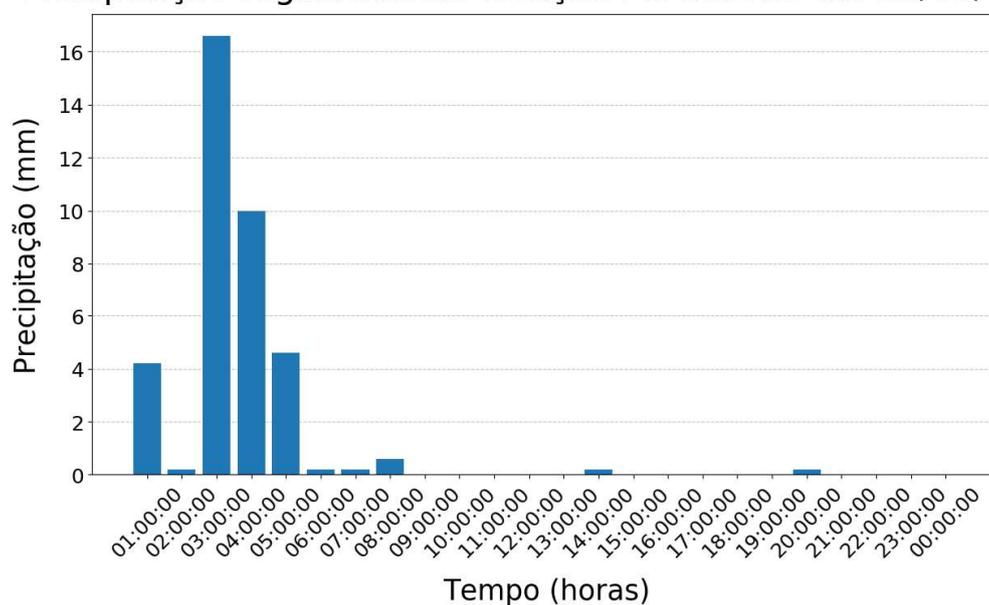
Sendo assim, com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento, as duas comportas da barragem foram abertas, liberando cerca de $350 \text{ m}^3/\text{s}$ e fornecendo condições para reter o volume de água previsto. A Defesa Civil do estado e dos municípios foi de imediato alertada, entrando em ação para retirada da população ribeirinha das áreas mais afetadas pela operação.

Como consequência da abertura das comportas da barragem de Carpina e do vertimento das barragens de Tapacurá e Goitá, a vazão do Capibaribe atingiu o limite da calha em quase todo seu curso, porém extravasando e provocando inundações nas áreas ribeirinhas do Recife no dia 05/05/2011.

Neste dia no Recife foram registradas precipitações acumuladas de 37 mm na estação PEA301 do INMET e 26,75 mm na estação 32568 do INPE. Os hietogramas relativos a esses eventos são apresentados nas Figuras 24 e 25 a seguir.

Figura 24 - Registro da precipitação no dia 05/05/2011 na estação PEA301.

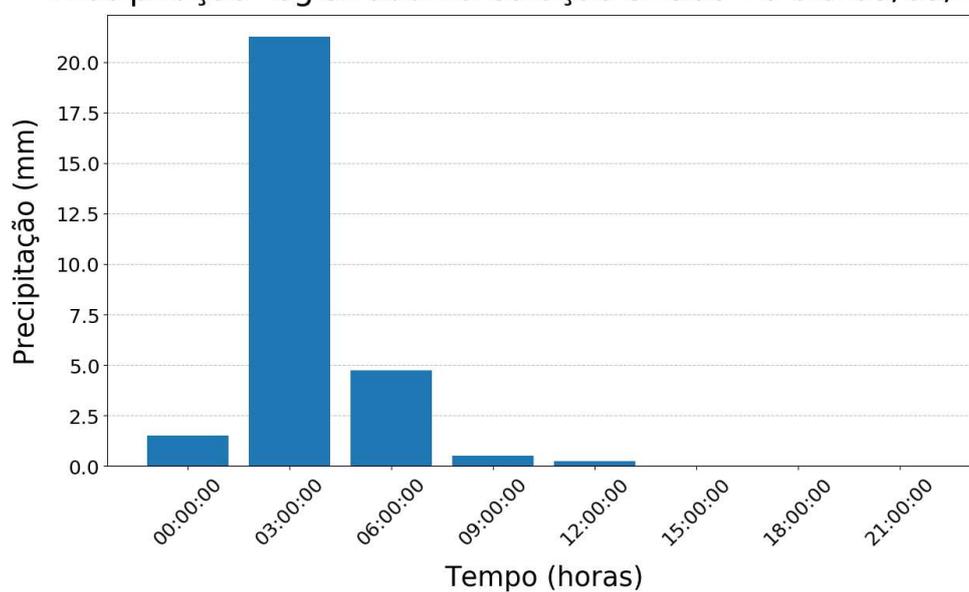
Precipitação registrada na estação PEA301 no dia 05/05/2011



Fonte: A autora (2019)

Figura 25 - Registro da precipitação no dia 05/05/2011 na estação 32568.

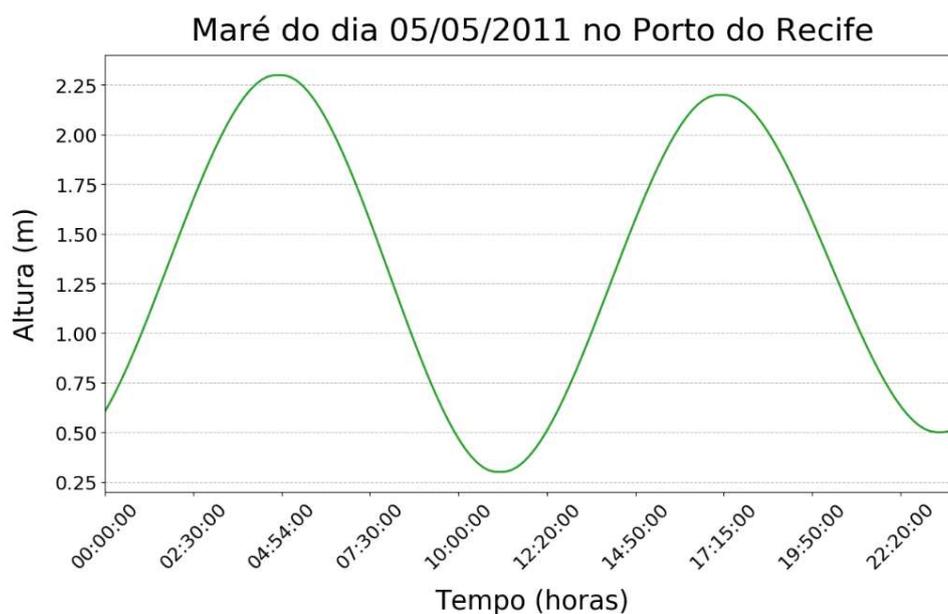
Precipitação registrada na estação 32568 no dia 05/05/2011



Fonte: A autora (2019)

Em relação às marés, as alturas das preamares foram de 2,3 m e 2,2 m às 4:54 e 17:15, respectivamente. A Figura 26 apresenta o gráfico da maré do dia 05/05/2011 obtido através do método de interpolação hermitiana citado anteriormente.

Figura 26 - Maregrama do dia 05/05/2011 no Porto do Recife.



Fonte: A autora (2019)

Diversas localidades do Recife foram afetadas devido a essas condições, dentre as quais destaca-se a comunidade Vila Miguel Arraes, na Várzea, conforme pode ser visto na Figura 27.

Os jornais locais também reportaram alagamentos nos bairros do Cordeiro, devido ao transbordamento do canal Santa Rosa, e nos bairros Parnamirim e Casa Forte, devido ao transbordamento dos canais Paramirim e Serpro, conforme mostra a Figura 28.

Figura 27 - Vila Miguel Arraes inundada pela cheia de 2011.



Fonte: Jornal em formato digital^{4,5,6,7}

Figura 28 – Alagamentos decorrentes da cheia de 2011: (A) bairro de Casa Forte; (B) bairro do Cordeiro.



Fonte: Jornal em formato digital^{4,8}

⁴Disponível em: <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/05/atingidos-pelas-chuvas-em-pe-passam-de-140-mil-diz-defesa-civil.html>. Acesso em: 20 jun. 2019.

⁵Disponível em: <https://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/pe/pernambuco-tem-1445-mil-pessoas-afetadas-pelas-chuvas/n1300152282181.html>. Acesso em: 20 jun. 2019.

⁶Disponível em: noticias.bol.uol.com.br/ultimas-noticias/brasil/2011/05/05/pernambuco-ja-tem-144-mil-afetados-pelas-chuvas-outros-tres-estados-tem-prejuizos.htm#fotoNav=23. Acesso em: 20 jun. 2019.

⁷Disponível em: <https://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/pe/numero-de-afetados-pelas-chuvas-em-pernambuco-chega-a-2224-mil/n1300155835120.html>. Acesso em: 20 jun. 2019.

⁸Disponível em: http://blogdoedneysouto.blogspot.com/2011_05_05_archive.html. Acesso em: 21 jun. 2019.

4 RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados compreendem os produtos gerados a partir da modelagem hidrodinâmica bidimensional. Nas simulações hidrodinâmicas realizadas neste trabalho não foram identificadas instabilidades que impedissem a realização dos cálculos. A simulação bidimensional, embora mais sofisticada quanto ao detalhamento do terreno e formulação matemática, se torna um processo mais simples do que a simulação 1D, por se apresentar mais estável.

Outra vantagem da abordagem bidimensional é a possibilidade de visualizar facilmente o hidrograma em qualquer seção desenhada sobre a malha, a direção das linhas de fluxo e a variação espacial da velocidade. Tais informações são fornecidas em forma de gráficos, tabelas ou mapas. Além disso, é possível visualizar, em formato de vídeo, a expansão da inundação a cada passo de simulação, permitindo mais clareza sobre o comportamento da inundação.

O tempo de processamento de cada simulação foi da ordem de 2 horas, considerando um computador com 16GB de memória RAM, processador Intel Core i7 4510U com velocidade base de 2.6 GHz e dois núcleos de processamento. Vale salientar que o tempo de processamento variou significativamente em função das dimensões das células e da extensão do período simulado.

4.1 ENCHENTE DE 1975

A Figura 29 apresenta a mancha de inundação estimada pela simulação hidrodinâmica. Para esse evento, a vazão de pico em São Lourenço foi estimada em 2.400 m³/s, a qual, devido à sua proximidade com a cidade do Recife, pode ser considerada a vazão de entrada na cidade. A mancha de inundação simulada atingiu uma área de 32,3 km² e a lâmina de d'água na calha do rio Capibaribe foi elevada em quase 13 m acima do leito normal em alguns pontos.

Dentre as regiões atingidas destacam-se os bairros Paissandu, Ilha do Leite, Ilha do Retiro, Joana Bezerra e Zumbi, os quais ficaram totalmente submersos.

A simulação também mostra que os bairros de Coelhos, Boa Vista, Derby, Madalena, Prado, Poço da Panela e Casa Forte foram bastante afetados, tendo quase que a totalidade de suas áreas inundadas.

No bairro do Cordeiro, próximo às margens do canal Santa Rosa, ao longo da Avenida Professor Estevão F. da Costa, a altura da lâmina d'água ultrapassou 3 m. Os bairros próximos da Av. Caxangá e Dois Irmãos foram os que apresentaram os maiores níveis de água, ultrapassando 5 m nas regiões próximas às margens do rio Camaragibe.

De maneira geral, a simulação forneceu resultados coerentes com os registros fotográficos do evento, como pode ser visto na Figura 30, a qual apresenta as alturas de lâmina d'água estimadas para as proximidades do estádio do Sport. Comparando as Figuras 20 (registro fotográfico do bairro Ilha do Retiro) e a Figura 30, tem-se que as estimativas da simulação são bastante plausíveis.

Figura 30 - Detalhes dos níveis da inundação estimados para Ilha do Retiro.



Fonte: A autora (2019)

A mancha de inundação estimada através da simulação hidrodinâmica bidimensional foi bastante semelhante à mancha determinada por Alcoforado (2006), que também avaliou a ocorrência de inundações no Recife. Apesar da grande magnitude da inundação estimada, os registros da época indicam que o alcance da inundação foi ainda maior. Isso porque no presente trabalho foi avaliada apenas a região do Recife inserida na bacia do Capibaribe. Sendo assim, as inundações dos demais bairros do Recife podem ter sido oriundas do extravasamento dos outros rios que cortam a cidade, como é o caso dos bairros São José, Cabanga, Afogados, San Martin, Torrões, Engenho do Meio, Curado e Várzea, os quais estão parcialmente inseridos na bacia do rio Tejipió. Um exemplo concreto é o bairro do Arruda, em que registros fotográficos (Figura 19) mostram as proximidades do estádio do Arruda completamente inundadas em 1975. No entanto, o bairro do Arruda está inserido na bacia do rio Beberibe e é cortado pelo canal Vasco da Gama.

Além disso, alguns bairros, como o bairro do Recife e Santo Antônio, não foram considerados no desenho da malha, devido às configurações das condições de contorno externas. Os dados de batimetria compreendiam o trecho do rio Capibaribe que se estendia da BR 101 até alguns metros antes da ponte 6 de Março, de modo que a condição de contorno externa não foi estabelecida de fato na foz do rio, mas sim a montante da ponte. No HEC-RAS 2D as condições de contorno externas não podem estar inseridas dentro da malha, mas sim no seu limite.

Também cabe lembrar que, devido à ausência de dados medidos na estação fluviométrica de São Lourenço da Mata, o hidrograma utilizado na condição de contorno de montante foi estimado, podendo estar subestimado.

Por fim, deve-se considerar que, após a enchente de 1975, diversas intervenções foram realizadas sobre a calha do rio, incluindo retificação e alargamento de alguns trechos. Tais intervenções contribuíram para o aumento da capacidade de escoamento da calha e redução das inundações. No entanto, o MDT aqui utilizado é proveniente do ano de 2014, ou seja, já incorpora as modificações efetuadas. Dessa maneira, é de se esperar que o modelo forneça uma mancha de inundação menor do que a estimada pelos registros da época.

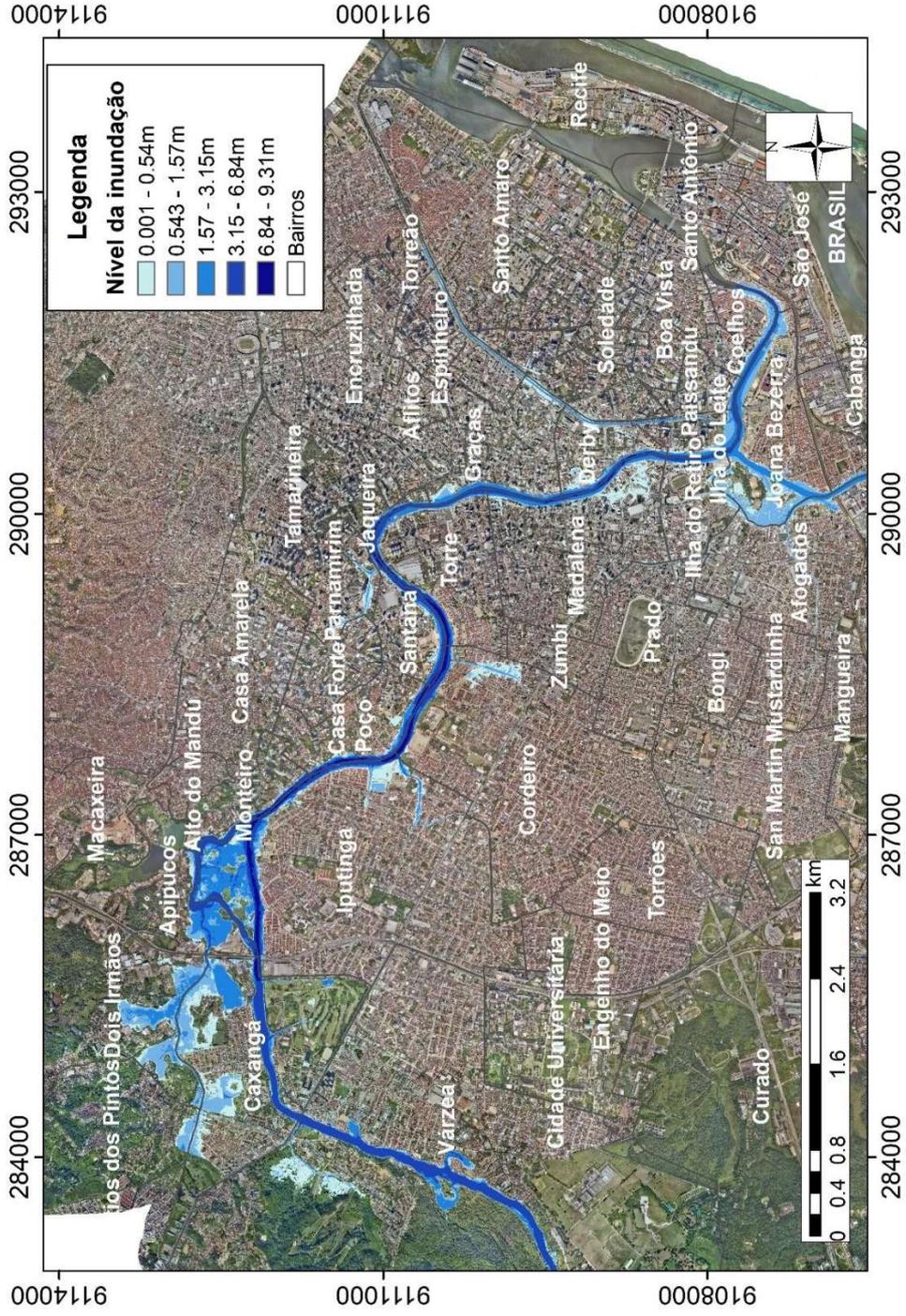
Outras simulações foram feitas, considerando agora a hipótese de existência do conjunto de barragem em 1975. A Figura 31 apresenta a mancha de inundação para o mesmo evento considerando o efeito do sistema contenção de cheia a bacia do Capibaribe, o qual compreende as barragens de Tapacurá, Goitá, Carpina e Jucazinho. Nesse cenário, a vazão de pico foi estimada em 486,6 m³/s (GOMES, 2019). De acordo com o resultado da simulação hidrodinâmica, essa vazão, juntamente com a contribuição da precipitação local e a influência da maré, provocaria apenas transbordamentos pontuais da calha do rio Capibaribe.

Também são observados transbordamentos nos canais Derby-Tacaruna, Parnamirim, Serpro, Santa Rosa, São Mateus e no canal do Cavouco a jusante da sua confluência com o canal do Caiara. Contudo, as alturas de água observadas são da ordem de centímetros.

Assim como no cenário anterior, as proximidades do rio Camaragibe se apresentam como áreas facilmente inundáveis. Neste caso, houve extravasamento da calha em toda extensão do rio e os níveis de água observados ultrapassaram 1 m.

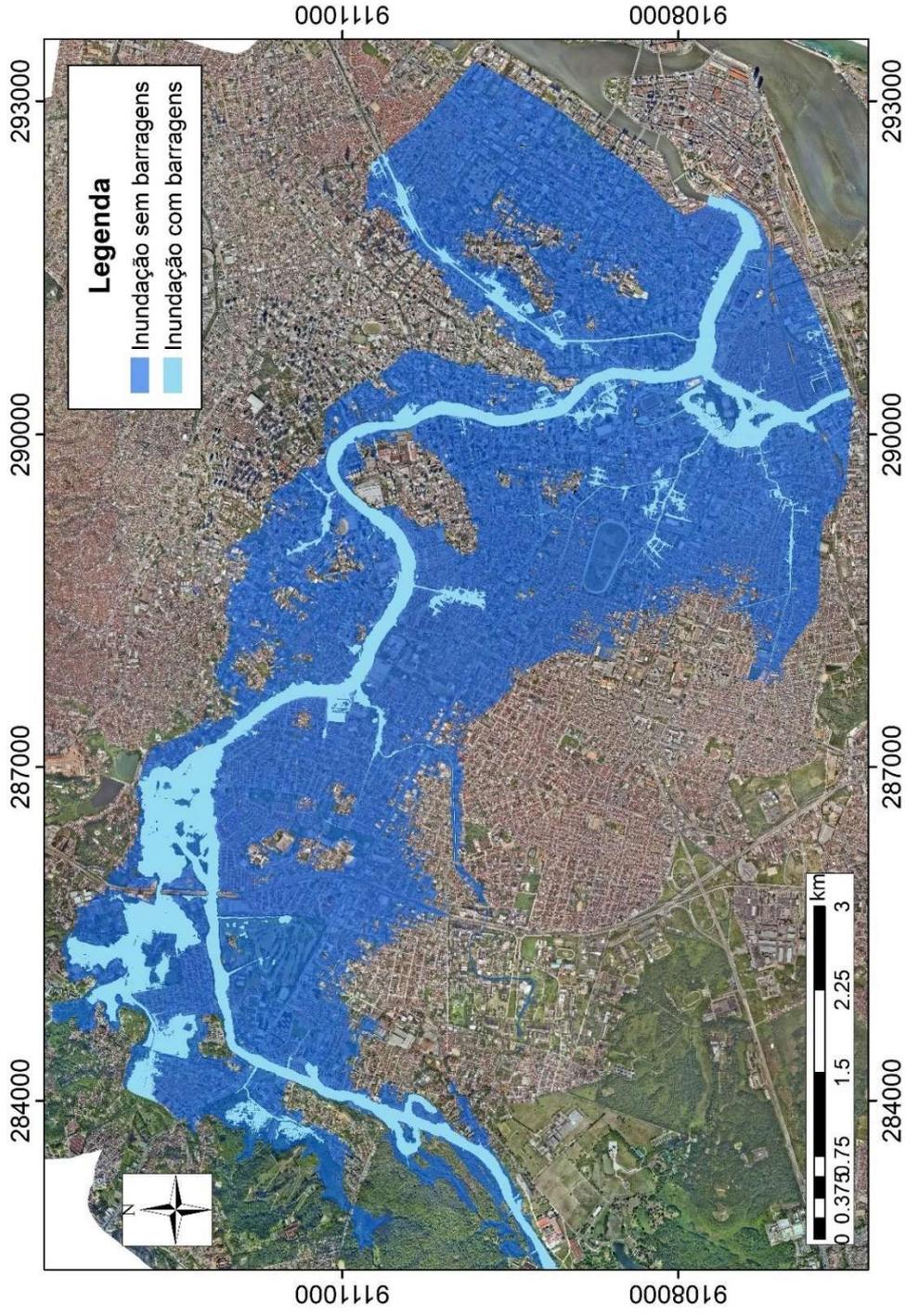
Para esse cenário, a área da mancha de inundação estimada foi de 5,84 km² e o nível máximo de água na calha do rio foi em torno de 9 m. Dessa forma, observa-se que a existência do sistema de contenção de cheias teria reduzido em cerca de 82% a extensão da inundação de 1975. A Figura 32 apresenta a sobreposição das manchas de inundação para os cenários com e sem barragens.

Figura 31 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 1975 com barragens.



Fonte: A autora (2019)

Figura 32 - Sobreposição das manchas de inundação da cheia de 1975 com e sem barragens.



Fonte: A autora (2019)

O cenário com barragens também foi simulado considerando as projeções de aumento do nível médio dos mares (NMM) em 38 e 82 cm. Esse cenário foi escolhido por permitir uma melhor visualização do impacto dessas projeções sobre a rede de drenagem. Para isso, as alturas de maré foram somadas aos valores de elevação do nível dos mares.

A Tabela 11 apresenta as áreas das manchas de inundação para as duas projeções avaliadas.

Tabela 11 - Área das manchas de inundação para as projeções de aumento do NMM.

Cenário	Área da mancha de inundação (km²)
Enchente de 75 com barragem (cenário base)	5,84
Enchente de 75 com barragem e aumento do NMM em 38 cm (projeção 1)	5,91
Enchente de 75 com barragem e aumento do NMM em 82 cm (projeção 2)	6,84

Fonte: A autora (2019)

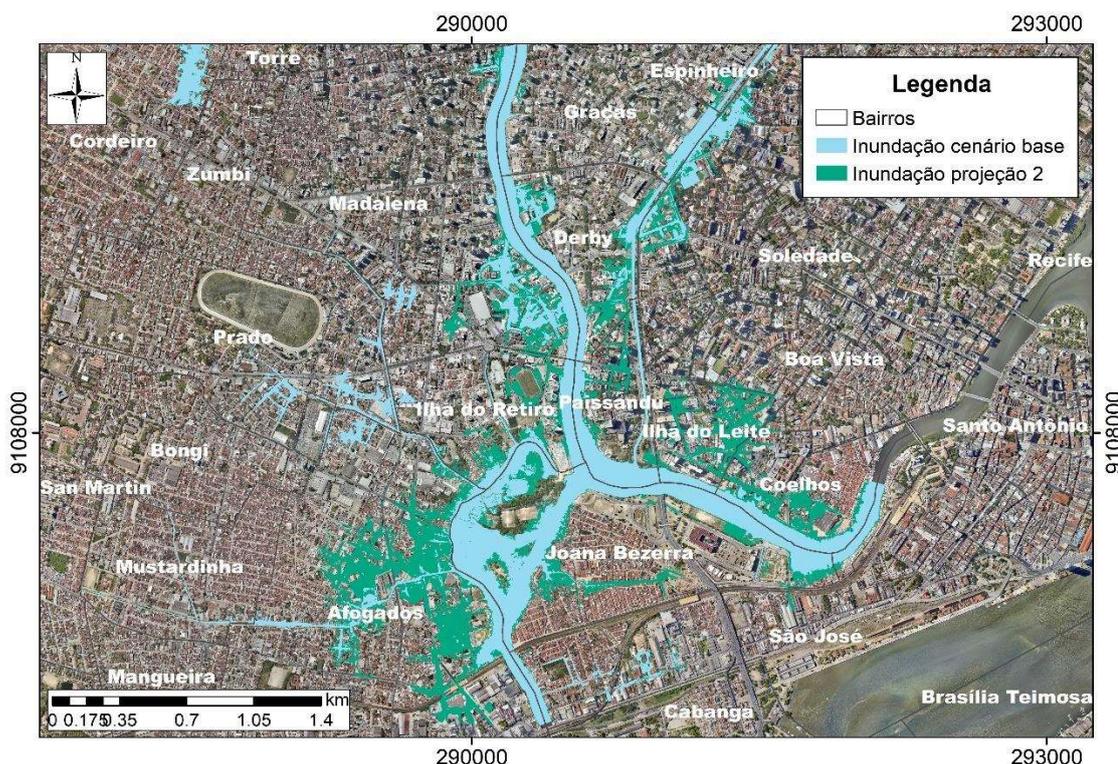
Pode-se observar que o impacto do aumento de 38 cm do nível do mar na extensão da inundação é baixo. Em termos percentuais, o aumento é de 1,2% na área da mancha de inundação. Tal modificação é pequena e não chega a ser perceptível visualmente.

Silva (2019) obteve resultados semelhantes ao avaliar o impacto do aumento do NMM na extensão da inundação provocada por eventos intensos na bacia do rio Tejipió, no Recife. Yang *et al.* (2015) também utilizaram uma abordagem semelhante para avaliar o impacto do aumento do nível dos mares. Os autores constataram que a mudança incremental de profundidade da água na área inundada não ocorre na mesma proporção do aumento do nível do mar.

A projeção de aumento do NMM em 82 cm, porém, resultou em um aumento de 17,1% na área da mancha de inundação. As regiões mais afetadas por esse aumento

seriam os bairros de Afogados e Ilha do Leite. Os bairros Ilha do Retiro, Coelhos, Joana Bezerra, Paissandu e Derby também apresentariam, em menor grau, aumento da área inundável. A Figura 33 apresenta a sobreposição das manchas de inundação do cenário base (cheia de 1975 com barragem) e do cenário base com a projeção 2.

Figura 33 - Sobreposição das manchas de inundação do cenário base e projeção 2.



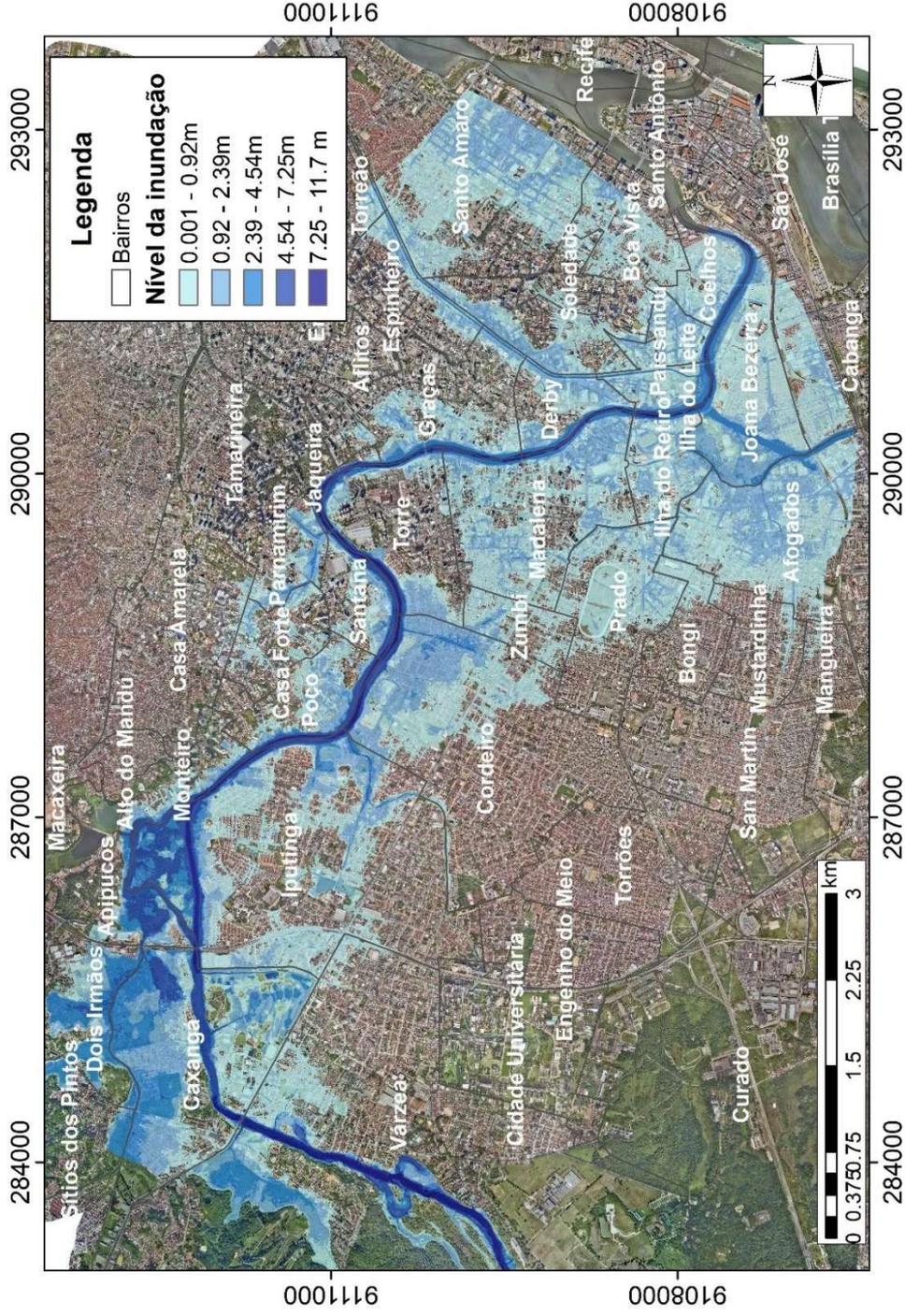
Fonte: A autora (2019)

4.2 ENCHENTE DE 2011

A Figura 34 apresenta a mancha de inundação para a enchente de 2011, no cenário de ausência do sistema contenção de cheia a bacia do Capibaribe. Nesse cenário, a vazão máxima foi estimada em 1344,08 m³/s (GOMES, 2019). Para esse evento, a simulação hidrodinâmica gerou uma mancha de inundação com uma área de 23,09 km² e a altura da lâmina de d'água na calha do rio Capibaribe ultrapassou 11 m em alguns pontos.

Assim como no evento de 1975, a simulação hidrodinâmica mostra que os bairros Paissandu, Ilha do Leite, Ilha do Retiro e Joana Bezerra seriam praticamente inundados totalmente.

Figura 34 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 2011 sem barragens.



Fonte: A autora (2019)

Esses bairros estão localizados em uma região bastante comercial do Recife, a qual apresenta diversos escritórios, lojas, centros médicos e grandes hospitais públicos e privados. A inundação dessa região traria prejuízos significativos tanto para os estabelecimentos quanto para a sociedade que usufrui dos serviços prestados.

Um importante centro comercial que seria bastante afetado é o Shopping Plaza, no bairro de Casa Forte. A simulação mostra que a lâmina de água nas margens do canal Parnamirim atingiria alturas superiores a 2 m. A inundação se estenderia da rua Dr. João Santos Filhos até a rua Leonardo Bezerra Cavalcante, deixando toda área do shopping sob uma lâmina de água de quase 2,5 m de altura.

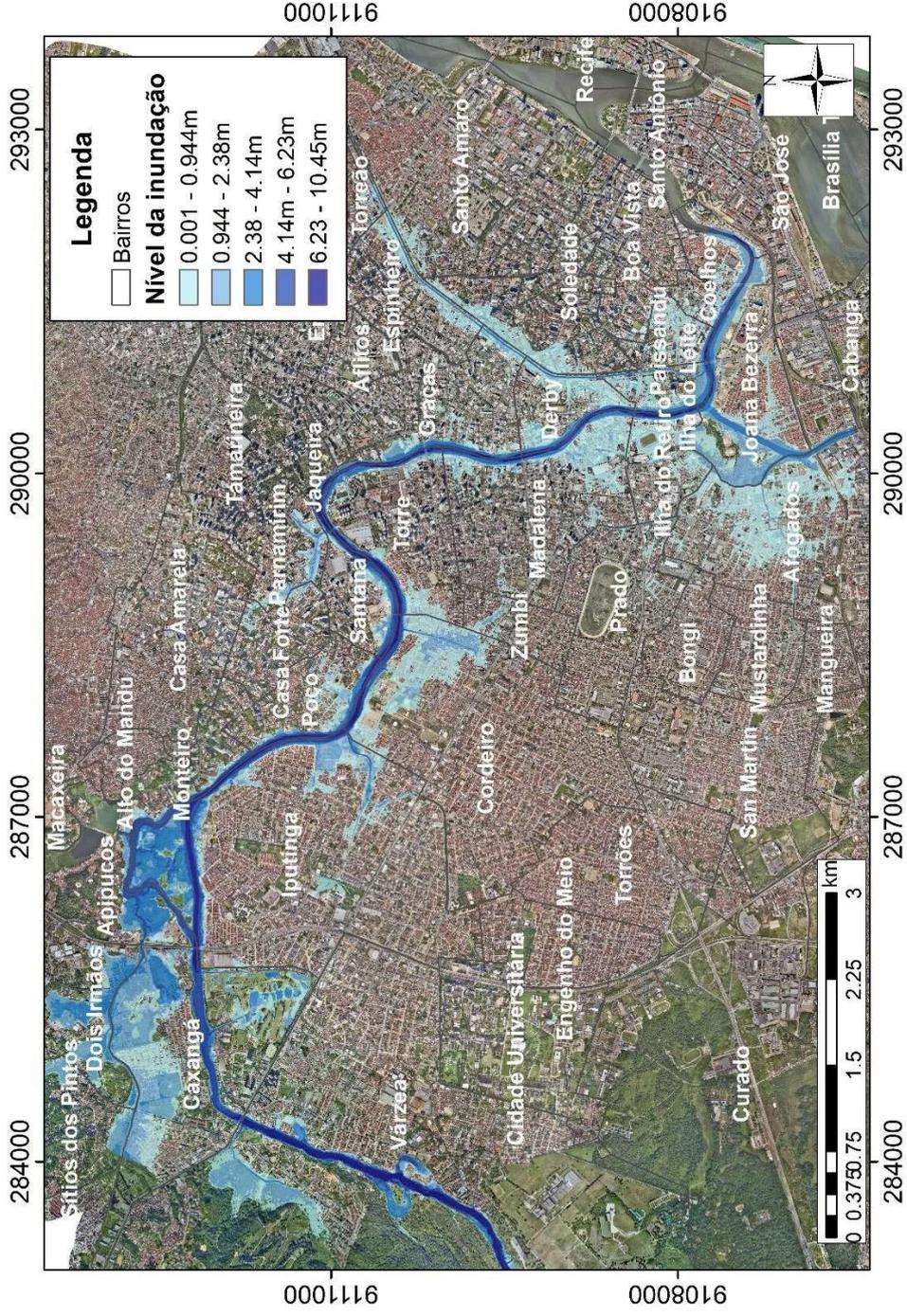
Os bairros do Cordeiro e da Iputinga apresentariam inundação de quase 3 m de altura nas proximidades dos canais Santa Rosa e Cavouco, respectivamente. Os bairros próximos da Av. Caxangá e Dois Irmãos novamente foram os que apresentaram as maiores lâminas d'água, em torno de 4 m nas proximidades do rio Camaragibe.

Diante desses resultados, constata-se que os impactos desse cenário seriam similares àqueles decorrentes da enchente de 1975, com o diferencial que a quantidade de pessoas e infraestrutura expostas seriam superiores, ou seja, os prejuízos seriam maiores.

A mancha de inundação estimada pela simulação hidrodinâmica para o evento de 2011 com as barragens está ilustrada na Figura 35. Nesse evento, a vazão de pico registrada em São Lourenço foi de 729,4m³/s. A área da mancha de inundação foi de 9,95 km² e o nível máximo de água na calha do rio foi de 10,4 m.

Observa-se uma redução significativa da área inundada nos bairros Paissandu, Ilha do Leite, Ilha do Retiro e Joana Bezerra. Também houve uma redução tanto da área inundada no bairro do Cordeiro quanto das profundidades da inundação, as quais foram de um pouco mais de 1 m nas proximidades do canal Santa Rosa.

Figura 35 - Mapa da mancha de inundação no Recife para cheia de 2011 com barragens.



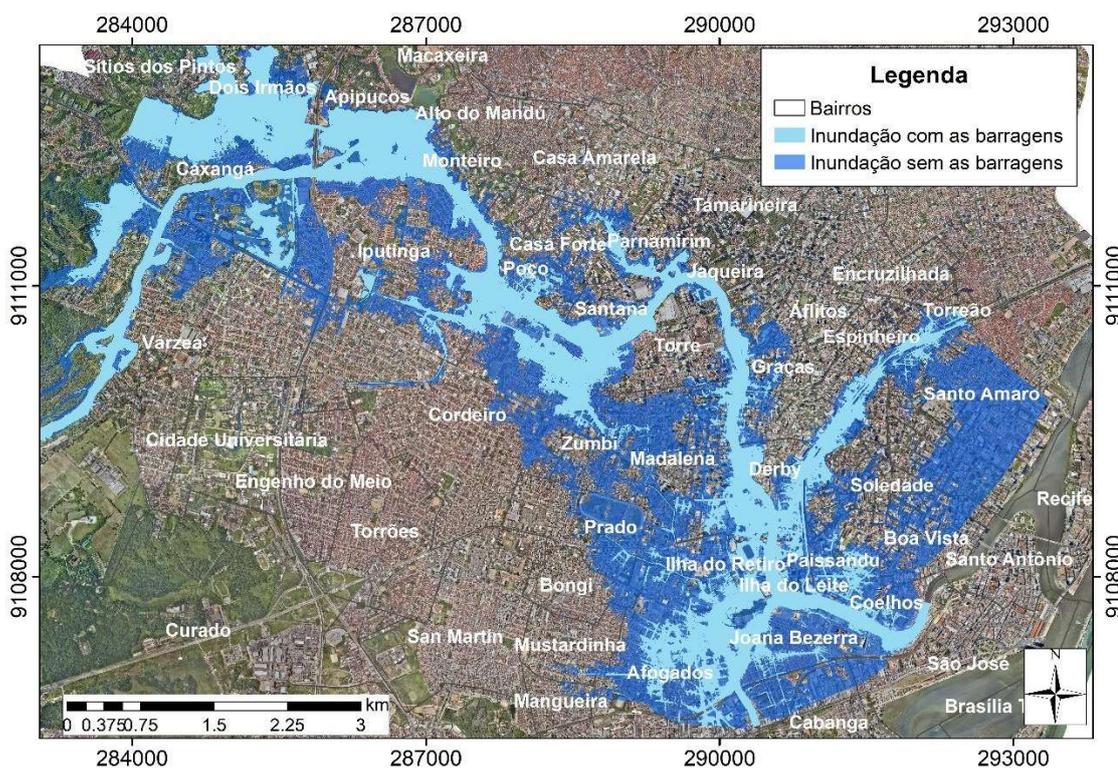
Fonte: A autora (2019)

A simulação também mostrou transbordamentos em quase toda extensão do canal Derby-Tacaruna, porém a altura da lâmina d'água se manteve abaixo de 1 m.

O canal do Parnamirim transbordou em toda sua extensão e a inundação atingiu o Shopping Plaza. No entanto, observa-se uma redução de cerca de 1 m nas alturas da lâmina d'água, as quais ficaram em torno de 1,4 m.

Comparando as áreas inundadas nesses dois cenários, tem-se que o sistema de contenção de cheias foi responsável pela redução em cerca de 57% da extensão da inundação de 2011. A Figura 36 apresenta a sobreposição das manchas de inundação para os cenários com e sem barragens.

Figura 36 - Sobreposição das manchas de inundação da cheia de 2011 com e sem barragens.



Fonte: A autora (2019)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo permitiu avaliar o impacto das inundações no Recife decorrentes das cheias no rio Capibaribe através da delimitação das áreas inundáveis. Diante dos cenários avaliados, percebe-se a grande importância do sistema de contenção de cheias para a prevenção de desastres no Recife.

A simulação hidrodinâmica bidimensional mostrou que, caso o sistema de contenção estivesse implementado, a área inundada pela cheia de 1975 seria 82% menor. Já para a cheia de 2011, os resultados indicam que, sem o amortecimento das barragens, a extensão da inundação seria 57% maior.

Apesar dos reservatórios prevenirem a ocorrência de cheias severas no baixo curso do rio Capibaribe, as altas vazões registradas em 2011 mostram que o Recife ainda se encontra vulnerável a inundações. Considerando que o evento de 2011 foi consequência da incidência de chuvas intensas sobre o médio Capibaribe, as quais levaram os reservatórios do sistema de contenção ao vertimento, as previsões de aumento da intensidade das precipitações, em decorrência das mudanças climáticas, sugerem aumento do risco de inundação nas cidades a jusante dos reservatórios.

Em relação ao impacto da elevação do nível dos mares, as simulações sugerem um acréscimo da área inundada, porém proporcionalmente menor que o aumento do nível do mar.

De maneira geral, as manchas de inundação fornecidas pelas simulações hidrodinâmicas se mostraram coerentes com o histórico de alagamentos na cidade do Recife. A qualidade dos resultados se deve principalmente à qualidade dos produtos do PE3D, os quais possibilitaram representar de maneira mais precisa as características físicas da área de estudo.

O MDT na escala 1:1000 fornecido pelo PE3D mostrou-se fundamental na modelagem hidrológica, permitindo a caracterização geomorfológica das bacias dos canais, inclusive daqueles de pequena extensão. MDT de resolução grosseira não seria capaz de identificar essas estruturas.

Também na modelagem hidrodinâmica bidimensional a resolução do MDT foi um diferencial, visto que a topografia do terreno determina o sentido e direção do escoamento dentro da malha. E de maneira similar à modelagem hidrológica, com o MDT do PE3D também é possível simular o escoamento nos canais do Recife, devido à sua alta resolução espacial.

As ortofotos do PE3D, por sua vez, possibilitaram uma precisa classificação do uso e ocupação do solo da área de estudo. Tal informação é fundamental para que o processo chuva-vazão seja representado de maneira mais fidedigna.

Por fim, a simulação hidrodinâmica bidimensional, por meio do *software* HEC-RAS, conseguiu representar o escoamento no estuário do rio Capibaribe, o qual é bastante complexo. O *software* respondeu bem ao estabelecimento de duas condições de contorno a jusante, conseguindo reproduzir as variações no sentido do fluxo do rio, decorrentes da influência do nível da maré, sem apresentar instabilidades.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- Avaliar detalhadamente o escoamento no rio Camaragibe, incluindo a inserção da batimetria na calha do rio, visto que em todas as simulações houve transbordamento da calha;
- Realizar simulações hidrológicas de cenários de aumento da magnitude das precipitações intensas sobre o Médio Capibaribe, com o intuito de avaliar o impacto sobre o sistema de contenção de cheias;
- Integrar os demais cursos d'água que cortam o Recife e as cidades vizinhas na simulação, como o Beberibe, para avaliar as inundações nas demais áreas.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. F.; VOJINOVIC, Z.; PRICE, R. K.; AZIZ, A. A. Improved methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modelling – accounting for elevated roads and bridges. **Journal of Hydroinformatics**, v. 14, n. 2, p.253-269, abr. 2012.

ACOFORADO, R. G; CIRILO, J. A. Sistema de Suporte à Decisão para Análise, Previsão e Controle de Inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p.133-153, 2001.

ALCOFORADO, R. G. **SIMULAÇÃO HIDRÁULICA-HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO EM REDES COMPLEXAS DE RIOS URBANOS: SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

ALEXANDER, L. V.; ARBLASTER, J. M. Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. **Weather and Climate Extremes**, v. 15, p.34-56, mar. 2017.

ALFIERI, L.; BUREK, P.; FEYEN, L.; FORZIERI, G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 5, p.2247-2260, 11 maio 2015.

ALFY, M. E. Assessing the impact of arid area urbanization on flash floods using GIS, remote sensing, and HEC-HMS rainfall–runoff modeling. **Hydrology Research**, v. 47, n. 6, p.1142-1160, 2016.

ALVES, F. H. B. **Sistema Avançado de Previsão de Enchentes: análises e melhorias aos modelos de previsão de chuva, hidrológico e hidrodinâmico**. 2017. Dissertação (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 Uma 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.

ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A.; POTERE, D. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. **Progress in Planning**, v. 75, n. 2, p.53-107, fev. 2011.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. **Climatic Change**, v. 134, n. 3, p.387-401, 6 mar. 2014.

BARNARD, P. L.; ERIKSON, L. H.; FOXGROVER, A. C.; HART, J. A. F.; LIMBER, P.; O'NEILL, A. C.; ORMONDT, M.; VITOUSEK, S.; WOOD, N.; HAYDEN, M.K.; JONES, J. M. Dynamic flood modeling essential to assess the coastal impacts of climate change. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p.1-13, 13 mar. 2019.

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

BATES, P. D.; MARKS, K. J.; HORRITT, M. S. Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 3, p.537-557, 2003.

BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p.211-222, jun. 2015.

BLANKESPOOR, B.; DASGUPTA, S.; LAPLANTE, B. Sea-Level Rise and Coastal Wetlands. **Ambio**, v. 43, n. 8, p.996-1005, 22 mar. 2014.

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

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. Recife e a convivência com as águas. *In*: LOBO, Rosana. **Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas**. Brasília: Gráfica Brasil, 2005, p. 111-130.

CASAS, A; BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R; RICO, M. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 4, p.444-456, 2006.

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

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. **Surveys in Geophysics**, v. 32, n. 4-5, p.585-602, 30 mar. 2011.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; KONIKOW, L. F.; DOMINGUES, C. M.; COGLEY, J. G.; RIGNOT, E.; GREGORY, J. M.; VAN DEN BROEKE, M. R.; MONAGHAN, A. J.; VELICOGNA, I. Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 18, p.1-8, 16 set. 2011.

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

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**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.

COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1-2, p.131-142, out. 2009.

COOK, J.; ORESKES, N.; DORAN, P. T.; ANDEREGG, W. R. L.; VERHEGGEN, B.; MAIBACH, E. W.; CARLTON, J. S.; LEWANDOWSKY, S.; SKUCE, A. G. Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 4, p.1-7, 1 abr. 2016.

CPRM. **Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife**. Recife, 2001.

EM-DAT. **CRED Crunch 54 - Disasters 2018: Year in Review**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2019. Disponível em: <https://www.emdat.be/publications>. Acesso em: 01 jun. 2019.

EMLURB. Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. *In: **Elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife***. Recife, 2016.

ESPINDOLA, R. L. **DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DA MARÉ ASTRONÔMICA**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p.137-147, 2014.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 158 p., 2000.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

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

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

GOPALAKRISHNAN, T. C.; RA'AD, L. Computation of Intermediate Water Levels Between High and Low Tides. *In: International Conference on Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies. **Proceedings** [...]*. Los Angeles: Computational Mechanics, 1986. p. 445-455.

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

GÜL, G. O.; HARMANÇİOĞLU, N.; GÜL, A. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. **Natural Hazards**, v. 54, n. 2, p.245-260, 2 out. 2009.

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

HALWATURA, D.; NAJIM, M.M.M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, p.155-162, 2013.

HANSON, S.; NICHOLLS, R.; RANGER, N.; HALLEGATTE, S.; MORLOT-CORFEE, J.; HERWIJER, C.; CHATEU, J. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. **Climatic Change**, v. 104, n. 1, p.89-111, 7 dez. 2010.

HINKEL, J.; LINCKE, D.; VAFEIDIS, A. T.; PERRETTE, M.; NICHOLLS, R. J.; TOL, R. S. J.; MARZEOIN, B.; FETTWEIS, X.; IONESCU, C.; LEVERMANN, A. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. **Proceedings of The National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p.3292-3297, 3 fev. 2014.

HIRABAYASHI, Y.; MAHENDRAN, R.; KOIRALA, S.; KONOSHIMA, L.; YAMAZAKI, D.; WATANABE, S.; KIM, H.; KANAE, S. Global flood risk under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p.816-821, 9 jun. 2013.

HODGKINS, G.; DUDLEY, R.; ARCHFIELD, S.; RENARD, B. Effects of climate, regulation, and urbanization on historical flood trends in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 573, p.697-709, jun. 2019.

HOHENTHAL, J.; ALHO, P.; HYYPPA, J.; HYYPPA, H. Laser scanning applications in fluvial studies. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 35, n. 6, p.782-809, 25 jul. 2011.

HU, A.; DESER, C. Uncertainty in future regional sea level rise due to internal climate variability. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 11, p.2768-2772, 3 jun. 2013.

HUNTER, N. M.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; WILSON, M. D Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. **Geomorphology**, v. 90, n. 3-4, p.208-225, out. 2007.

IBGE. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.com.br>. Acesso em: 05 abr. 2019.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom, Cambridge, 2007. Disponível em: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf. Acesso em: 25 mai. 2019.

IPCC. **Climate change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom, Cambridge, 2013. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. Acesso em: 27 mai. 2019.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Switzerland, Geneva, 2015. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 30 mai. 2019.

JACOBSON, C. R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p.1438-1448, jun. 2011.

JHA, A. K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cidades e inundações: um guia para a gestão integrada do risco de inundação urbana para o século XXI**. The World Bank, 2012.

JONGMAN, B.; WARD, P. J.; AERTS, J. C. J. H. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 4, p.823-835, out. 2012.

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**, v. 13, n. 1, p.75-94, mar. 2013.

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.

KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; WEHNER, M. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. **Climatic Change**, v. 119, n. 2, p.345-357, 20 fev. 2013.

MARTINS, V. C. D. **AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PREVENÇÃO E CONTENÇÃO DE INUNDAÇÕES EM BACIAS DE DRENAGEM URBANA**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém do Pará, 2015.

MILLER, J. D.; KIM, H.; KJELDSEN, T. R.; PACKMAN, J.; GREBBY, S.; DEARDEN, R. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. **Journal of Hydrology**, v. 515, p.59-70, jul. 2014.

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

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 HEC-HMS and HEC-GEOHMS. **Environmental Earth Sciences**, 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.

NASCIMENTO, V. F.; RIBEIRO NETO, A. R. Characterization of reservoirs for water supply in Northeast Brazil using high resolution remote sensing. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.22, p. 1-9, 2017.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. **Science**, v. 328, p.1517-1520, 2010.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório**

Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

PAPAIIOANNOU, G.; LOUKAS, A.; VASILIADES, L.; ARONICA, G. T. Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. **Natural Hazards**, v. 83, n. 1, p.117-132, 28 maio 2016.

PAZ, A. R. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação.** 2010. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

PFALTZGRAFF, P. A. S. **MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE.** 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PINOS, J.; TIMBE,. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. **Water Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p.11-18, mar. 2019.

RAJCZAK, J.; SCHÄR, C. Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.122, n. 20, p.10773-10800, 23 out. 2017.

RIBEIRO NETO, A. R; BATISTA, L. F. D .R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p.377-390, 2016.

RIBEIRO NETO, A. R.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n. 2, p. 394-403, 2015.

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

SABÓIA, M. A. M.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p.1-15, 2017.

SAKSENA, S.; MERWADE, V. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 530, p.180-194, nov. 2015.

SANTOS, J. B. **MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS, BOTUCATU-SP**. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio Mundaú**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCHUMANN, G.; MATGEN, P.; CUTLER, M. E. J.; BLACK, A.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L. Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 3, p.283-296, maio 2008.

SETO, K. C. Exploring the dynamics of migration to mega-delta cities in Asia and Africa: Contemporary drivers and future scenarios. **Global Environmental Change**, v. 21, p.94-107, dez. 2011.

SETO, K. C.; GUNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. **Proceedings of The National Academy of Sciences**, v. 109, n. 40, p.16083-16088, 17 set. 2012.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 6, p.2473-2493, 25 mar. 2013.

SILVA, E. R. ; OFICIALDEGUI, E. ; CIRILO, J. A. ; RIBEIRO NETO, A. ; DANTAS, C.E.O. ; SANTOS, K. A. MONITOR AVANÇADO DE ENCHENTES (MAVEN): A HYDROCLIMATOLOGIC COMPUTATIONAL FRAMEWORK FOR EARLY FLOOD ALERT SYSTEMS. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD

MANAGEMENT, 6., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: 6th International Conference on Flood Management, 2014. p. 1-10.

SILVA JUNIOR, M. A. B. J.; SILVA, S. R.; CABRAL, J. J. P. S. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p.1-12, 2017.

SILVA, P. O. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub- bacia do rio Jiquiá no Recife**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SILVA, P.O. **Modelagem hidrológica do rio Tejipió por ocasião de chuvas intensas levando em conta o efeito de marés**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. P. S. Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p.7-18, 2014.

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

SOLOMON, S.; PLATTNER, G.; KNUTTI, R.; FRIEDLINGSTEIN, P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. **Proceedings of The National Academy of Sciences**, v. 106, n. 6, p.1704-1709, 28 jan. 2009.

SURIYA, S.; MUDGAL, B.V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. **Journal of Hydrology**, v. 412-413, p.210-219, jan. 2012.

TATE, E. C.; MAIDMENT, D. R.; OLIVERA, F.; DAVID, J. A. Creating a Terrain Model for Floodplain Mapping. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 2, p.100-108, mar. 2002.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bulletin of The American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p.485-498, abr. 2012.

TRENBERTH, K. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1, p.123-138, 31 mar. 2011.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades : Global Water Partnership - World Bank – Unesco, 2005a.

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

UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. 2.ed. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS: User's Manual**. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016. 960p.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p.5-31, 5 ago. 2011.

YANG, Z.; WANG, T.; VOISIN, N.; COPPING, A. Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 156, p.19-30, abr. 2015.

YIN, J.; YU, D.; LIN, N.; WILBY, R. L. Evaluating the cascading impacts of sea level rise and coastal flooding on emergency response spatial accessibility in Lower Manhattan, New York City. **Journal of Hydrology**, v. 555, p.648-658, dez. 2017.

ZONENSEIN, J. **ÍNDICE DE RISCO DE CHEIA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DE ENCHENTES**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

APÊNDICE A – ALGORITMO INTERPOLAÇÃO DE MARÉ

```

import csv
import pandas as pd
from datetime import datetime
from pandas import Series, DataFrame
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
mes = 'maio'
ano = '2011'
start = datetime.strptime("01/05/2011", "%d/%m/%Y")
end = datetime.strptime("01/06/2011", "%d/%m/%Y")
index = pd.date_range(start, end)
df = pd.DataFrame(index=index, columns=['ALTURA', 'INFLEXAO', 't', 'T', 'n1', 'n2', 'h1',
'h2'])
df = df.asfreq('10Min')
df['INFLEXAO'] = False
df.index.name = "DATAHORA"

csv.register_dialect('MyDialect', delimiter='\t', quotechar="", skipinitialspace=True,
quoting=csv.QUOTE_NONE, lineterminator='\n', strict=True)

with open('mares_maio_2011porto_recife.csv','r') as csvfile:
    reader = csv.DictReader(csvfile, dialect='MyDialect')
    delta_time_min = 0
    for row in reader:
        df.at[datetime.strptime(row['DATAHORA'], "%Y-%m-%d %H:%M:%S"),'ALTURA']
        = float(row['ALTURA'])
        df.at[datetime.strptime(row['DATAHORA'], "%Y-%m-%d
        %H:%M:%S"),'INFLEXAO'] = True
        df.at[datetime.strptime(row['DATAHORA'], "%Y-%m-%d %H:%M:%S"),'t'] = 0
        df.at[datetime.strptime(row['DATAHORA'], "%Y-%m-%d %H:%M:%S"),'T'] = 0

df = df.sort_index()
dataHoraAnterior=n1=n2=""
for index, row in df.iterrows():
    if row['INFLEXAO'] == True:
        n1 = row['ALTURA']
        dataHoraAnterior = index
    else:
        row['n1'] = n1
        row['t'] = (index - dataHoraAnterior).seconds // 60
        row['T'] = dataHoraAnterior

for index, row in list(df.iterrows())[:-1]:

```

```

if row['INFLEXAO'] == True:
    n2 = row['ALTURA']
    dataHoraAnterior = index
else:
    row['n2'] = n2
    row['T'] = (dataHoraAnterior - row['T']).seconds // 60
for index, row in df.iterrows():
    if row['INFLEXAO'] == False:
        row['h1'] = 1 - 3*(row['t']/row['T'])**2 + 2*(row['t']/row['T'])**3
        row['h2'] = 3*(row['t']/row['T'])**2 - 2*(row['t']/row['T'])**3
        row['ALTURA'] = float(float(row['h1'])*float(row['n1']) +
        float(row['h2'])*float(row['n2']))
df = df.round(4)
print(df)
df.to_csv("mares_"+mes+"_"+ano+".csv",sep=',', decimal='.')
plt.plot(df.index, df.ALTURA)
plt.savefig("plot_mares_"+mes+"_"+ano+".png")
plt.show()

```