



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

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES NA
BACIA DO FRAGOSO – OLINDA/PE**

Recife

2021

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES NA
BACIA DO FRAGOSO – OLINDA/PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

R696m Rodrigues, Arivânia Bandeira.
Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de inundações na Bacia do
Fragoso – Olinda/PE / Arivânia Bandeira Rodrigues. - 2021.
165 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Modelagem hidrodinâmica bidimensional. 3.
PE3D. 4. Inundação. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira
(Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2021-129

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES
NA BACIA DO FRAGOSO - OLINDA/PE**

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

Aprovada em 26/01/2021.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Simone Rosa da Silva (examinadora externa)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Almir Cirilo (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua bondade eterna e fortaleza para mais um desafio.

Aos meus pais, pelo exemplo de luta, força, incentivo e pelo amor incondicional durante mais uma jornada.

À minha irmã, avós, tios, primos pelo apoio, orações e o conforto quando precisei e demais familiares que formam um suporte fundamental para mim.

Ao meu namorado, por todo amor, acolhimento e apoio.

Aos amigos do GRH pelo companheirismo, dúvidas compartilhadas, conhecimento adquirido e também os momentos de descontração, em especial ao Grupo de Drenagem Urbana e os Varzeanos.

Aos professores do Galpão de Recursos Hídricos por todo apoio, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao meu orientador Jaime Cabral, pelo imensurável conhecimento transmitido, dedicação, suporte e incentivo na busca por sempre melhorar.

Aos funcionários do GRH e Pós Graduação em Engenharia Civil, por toda colaboração e contribuição para a execução desse trabalho.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE pela bolsa concedida.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de mais uma conquista em minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

Com o crescimento populacional e as consequentes mudanças no uso e ocupação do solo, associado às projeções de mudanças climáticas e o método tradicional de drenagem, que tem se mostrado ineficiente, a necessidade de novas técnicas vem surgindo, em busca de soluções para problemas de alagamentos nas áreas urbanas. Dessa forma, o presente trabalho buscou avaliar medidas estruturais e não-estruturais e seus efeitos nas inundações na cidade de Olinda em resposta a diferentes eventos de precipitação pluviométrica de intensidade média e elevada, na região da Bacia do Rio Frágoso, visto que essa região possui um processo de ocupação desordenado, associado a um sistema de drenagem vulnerável. Para isso, foram avaliados diversos cenários para obtenção das áreas inundáveis, mapas indicadores de perigo, com simulações antes e depois da construção do canal do Frágoso e a aplicação da técnica de desenvolvimento de baixo impacto microrreservatórios de retenção em lote. Os *softwares* SWMM e HEC-RAS foram utilizados para a realização da modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional, respectivamente. Para a caracterização do uso e ocupação do solo foram utilizados dados do MapBiomas, e para geomorfologia da área de estudo, foram utilizados os produtos do levantamento do terreno a laser que compõem o projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). As simulações responderam de forma satisfatória, permitindo melhor compreensão da extensão das inundações. Comparando as simulações antes e depois da finalização das obras do canal do Frágoso, obteve-se uma redução da área total alagada, mas percebe-se que os problemas de inundação persistirão. Para a aplicação da técnica dos microrreservatórios de lote, as sub-bacias que apresentam menor percentual de área impermeável, apresentaram melhores resultados, e as sub-bacias com maiores índices de urbanização, mostraram redução da vazão de pico menor, porém com a continuidade no desempenho satisfatório dos resultados.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica bidimensional; PE3D; inundação.

ABSTRACT

With population growth and the consequent changes in land use and occupation, associated with projections of climate change and the traditional drainage method, which has been shown to be inefficient, the need for new techniques has been emerging, in search of solutions to flooding problems in urban areas. Thus, the present work sought to evaluate structural and non-structural measures and their effects on the floods in the city of Olinda in response to different events of medium and high intensity rainfall in the region of the Rio Fragoso Basin, since this region has a disorderly occupation process, associated with a vulnerable drainage system. For this, several scenarios were evaluated to obtain the flooded areas, hazard indicator maps, with simulations before and after the construction of the Fragoso channel and the application of the low impact micro-detention development technique in batch. The SWMM and HEC-RAS softwares were used to perform the two-dimensional hydrological and hydrodynamic modeling, respectively. For the characterization of land use and occupation, data from MapBiomas were used, and for the geomorphology of the study area, the products of the laser land survey that make up the Pernambuco Three-dimensional project (PE3D) were used. The simulations responded satisfactorily, allowing a better understanding of the extent of the floods. Comparing the simulations before and after the completion of the works on the Fragoso channel, a reduction in the total flooded area was obtained, but it is clear that the flooding problems will persist. For the application of the batch micro-reservoir technique, the sub-basins with the lowest percentage of impermeable area, presented better results, and the sub-basins with the highest urbanization indexes, showed a reduction in the lower peak flow, but with continuity in the satisfactory performance of the results.

Keywords: two-dimensional hydrodynamic modeling; PE3D; inundation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hidrograma de bacia rural e depois de urbanizada.	22
Figura 2 – Destruição causada pelas chuvas na Avenida Prudente de Moraes em janeiro de 2020 – Belo Horizonte , MG	23
Figura 3 – Alagamentos registrados após temporal em São Paulo – SP.	24
Figura 4 – Características dos leitos do rio.....	24
Figura 5 – Adaptação do parque Tåsinge Plads	31
Figura 6 – Exemplo de uma edificação antes e depois das mediadas da quota ambiental em São Paulo.	32
Figura 7 – Reservatório de detenção a céu aberto na cidade de Porto Alegre (RS).....	34
Figura 8 – Funcionamento do sistema de previsão e alerta.	39
Figura 9 – Campanha de Educação Ambiental	41
Figura 10 – Representação conceitual de um controle de LID – Bacia de Filtração	44
Figura 11 – Terminologia para modelagem computacional da malha no HEC-RAS 2D	48
Figura 12 – Localização da Bacia do rio Fragoso	53
Figura 13 – Drenagem do tipo canaleta na rua Gentil Ferreira Gusmão, Olinda - PE.....	55
Figura 14 – Boca de lobo obstruída.....	56
Figura 15 – Presença de vegetação rasteira	56
Figura 16 – Resíduos na boca de lobo.....	56
Figura 17 – Destinação incorreta de esgoto doméstico.	56
Figura 18 – Unidades Litoestratigráficas da Faixa Sedimentar Norte (PE) Seção Esquemática Leste Oeste Bacia do Rio Fragoso.	58
Figura 19 – Unidades geológicas para a bacia do rio Fragoso.	59
Figura 20 – Classificação do solo para a bacia do rio Fragoso.	60
Figura 21 – Cobertura vegetal originalmente da bacia do rio Fragoso	61
Figura 22 – Mapa da cobertura vegetal com destaque para bacia do rio Fragoso.....	62
Figura 23 – Presença de manguezais na bacia do rio Fragoso	63
Figura 24 – Simplificação da metodologia do MapBiomias	67
Figura 25 – Etapas metodológicas para classificação das áreas de infraestrutura urbana no MapBiomias.....	68
Figura 26 – Correção de erros do tipo “sink” por meio da execução da função “fill sinks”....	70
Figura 27 – Exemplo de execução da função “flow Direction”.	71
Figura 28 – Exemplo de determinação do fluxo acumulado.	71

Figura 29 – Afundamento do trecho do calçadão em Olinda – 30/05/2016.....	74
Figura 30 – Carro coberto pela água na Avenida Pan Nordestina, em Olinda – 30/05/2016...	74
Figura 31 – Esquema Ilustrativo para determinação do parâmetro de infiltração (CN).....	77
Figura 32 - Exemplificação do método analítico para obtenção da curva de maré.....	79
Figura 33 – Dados de entrada necessários para modelagem hidrodinâmica	82
Figura 34 – Comparação das imagens obtidas a partir das ortofotos (à esquerda) e o Google Earth (à direita) para análise da alteração do terreno.	83
Figura 35 – Alteração realizada no MDT com o rio canalizado em maio de 2016.....	83
Figura 36 – Refinamento da malha para o rio Fragoso canalizado.	84
Figura 37 - Refinamento da malha para o rio Fragoso natural.....	85
Figura 38 – Indicação das condições de contorno na bacia do Rio Fragoso.	85
Figura 39 – Representação das faixas de normalização da profundidade	86
Figura 40 – Variação do uso e ocupação do solo na bacia do Rio Fragoso para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2018.....	96
Figura 41 – Definição das áreas permeáveis e impermeáveis na Bacia do Rio Fragoso.	99
Figura 42 – Divisão das sub-bacias na bacia do rio Fragoso.....	100
Figura 43 – Variabilidade temporal da chuva de 30 de maio de 2016 nos postos da bacia do rio Fragoso	102
Figura 44 – Distribuição pluviométrica por estação com intervalos de uma hora.	102
Figura 45 - Distribuição dos postos pluviométricos e chuva acumulada em 30 de maio de 2016.	104
Figura 46 – Curva de maré para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016...	105
Figura 47 – Espacialização dos coeficientes de Manning calibrados na bacia do rio Fragoso.	108
Figura 48 – Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016.	109
Figura 49 – Distribuição dos pontos de máxima cheia utilizados para calibração.	110
Figura 50 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 1.	113
Figura 51 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 2.	114
Figura 52 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 3.	115

Figura 53 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 2 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso.	116
Figura 54 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 100 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso.....	117
Figura 55 – Coeficiente de Manning espacializado para o rio Fragoso canalizado.	119
Figura 56 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016 considerando a obra do canal finalizada.....	120
Figura 57 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 2 anos considerando a obra do canal finalizada.	121
Figura 58 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 100 anos considerando a obra do canal finalizada.	122
Figura 59 – Mapa do indicador de perigo como resultado de inundações para o período de retorno de 2 anos considerando a obra do canal finalizada.....	124
Figura 60 - Mapa do indicador de perigo como resultado de inundações para o período de retorno de 100 anos considerando a obra do canal finalizada.	125
Figura 61 – Representação do lote modelo padrão de 200 m ² simulado com aplicação de técnicas LID.....	128
Figura 62 – Representação 3D do lote padrão analisado.....	129
Figura 63 – Resultados mensais da simulação com volume ideal de 5.000 litros para o reservatório inferior em Olinda.	130
Figura 64 - Estimativa de consumo e economias mensais de água em Olinda	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características técnicas dos produtos do Pernambuco Tridimensional.....	50
Tabela 2 – Classificação da declividade.....	67
Tabela 3 – Dados das estações pluviométricas utilizadas na área de estudo para o período de 16 horas no dia 30 de maio de 2016.	75
Tabela 4 – Dados da maré - 30/05/2016.....	78
Tabela 5 – Faixas de normalização da cota de inundação.....	86
Tabela 6 – Valores de desempenho recomendados para simulações mensais	88
Tabela 7 – Resumo das características geomorfométricas da Bacia do Rio Fragoso.....	98
Tabela 8 – Dados de entrada das sub-bacias do modelo PCSWMM	100
Tabela 9 – Parâmetros determinados para dados de entrada no modelo PCSWMM.....	101
Tabela 10 – Coeficiente Curva-Número (CN) para cada sub-bacia.....	101
Tabela 11 – Resultado da intensidade da chuva de Recife em mm/h a partir da equação de chuva intensa do Plano Diretor de Drenagem Urbana (2015).....	104
Tabela 12 – Resultado do total pluviométrico de chuva de Recife em mm a partir da equação de chuva intensa do Plano Diretor de Drenagem Urbana (2015).....	105
Tabela 13 – Erros de continuidade para simulações sem alternativas de controle.....	106
Tabela 14 – Vazões máximas por sub-bacia para o evento em 30 de maio de 2016.	107
Tabela 15 – Coeficientes de rugosidade calibrados.....	107
Tabela 16 – Coeficientes estatísticos de calibração para a bacia do Rio Fragoso.....	111
Tabela 17 – Comparação entre as áreas alagadas e alturas máximas atingidas, considerando a obra do canal do Fragoso concluída.	123
Tabela 18 – Parâmetros para simulação dos reservatórios de retenção em lotes.....	126
Tabela 19 – Estrutura tarifária residencial de acordo com a Compesa.	130
Tabela 20 – Quantidade total de microrreservatórios em cada sub-bacia.....	131
Tabela 21 – Redução da vazão de pico por sub-bacia para o tempo de retorno de 2 anos.....	132
Tabela 22 – Redução da vazão de pico por sub-bacia adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 100 anos	133
Tabela 23 – Redução do volume de escoamento para o tempo de retorno de 2 anos	133
Tabela 24 – Redução do volume de escoamento adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 100 anos.....	134
Tabela 25 – Erros de continuidade na simulação com aplicação dos microrreservatórios em 25% das residências.....	135

Tabela 26 – Erros de continuidade na simulação com aplicação dos microrreservatórios em 50% das residências.....	135
---	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	DESENVOLVIMENTO URBANO	19
3.1.1	Inundações em razão da urbanização.....	21
3.1.2	Inundações de áreas ribeirinhas.....	24
3.2	DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL.....	26
3.3	MEDIDAS DE CONTROLE DAS CHEIAS URBANAS	34
3.3.1	Medidas estruturais	35
3.3.2	Medidas não estruturais.....	38
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	42
3.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	46
3.6	DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO	49
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	53
4.1	LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA	53
4.2	CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO.....	58
4.2.1	Geologia	58
4.2.2	Pedologia.....	60
4.2.3	Climatologia	60
4.2.4	Cobertura Vegetal	61
5	METODOLOGIA.....	65
5.1	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOMÉTRICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO.....	65
5.2	AVANÇO DA URBANIZAÇÃO COM USO DO MAPBIOMAS	67
5.3	PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O MODELO PCSWMM	69
5.3.1	Delimitação e caracterização das sub-bacias	69
5.3.2	Taxa de impermeabilização	72
5.3.3	Largura média das sub-bacias.....	72
5.3.4	Declividade média das subáreas	73

5.3.5	Coeficiente de rugosidade de Manning para as áreas permeáveis e impermeáveis.....	73
5.3.6	Altura de armazenamento em depressões de áreas permeáveis e impermeáveis.....	73
5.3.7	Definição da chuva de projeto	73
5.3.7.1	Precipitação na área de estudo	74
5.3.7.2	Dados obtidos pela Equação de Chuva Intensa do Recife.....	75
5.3.8	Determinação dos parâmetros de infiltração	76
5.3.9	Obtenção da curva de maré	78
5.3.10	Parâmetros da alternativa de controle dentro do modelo	79
5.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	81
5.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO	87
5.6	VALIDAÇÃO.....	89
5.7	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	89
5.7.1	Cenário 1 – Canal parcialmente construído (condições em 2019)	89
5.7.2	Cenário 2 - Conclusão da obra do canal do Fragoso.....	89
5.7.3	Cenário 3 – Canal construído e Reservatórios nos lotes	90
5.8	LAGOA DO FRAGOSO	91
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
6.1	DINÂMICA DA EXPANSÃO URBANA NA BACIA DO RIO FRAGOSO	93
6.2	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOMÉTRICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO.....	97
6.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA	99
6.3.1	Definição das Áreas Permeáveis e Impermeáveis.....	99
6.3.2	Modelagem hidrológica com o modelo PCSWMM	100
6.3.3	Modelagem Hidrodinâmica – Calibração	106
6.3.4	Validação	111
6.3.5	Cenário 2: Construção do canal do Fragoso	118
6.3.6	Cenário 3: Reservatórios de retenção em lote	126
7	CONCLUSÕES.....	136
8	RECOMENDAÇÕES.....	138
	REFERÊNCIAS.....	140
	APÊNDICE A – MAPAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO ANTES DA OBRA CONCLUÍDA DO CANAL DE FRAGOSO.....	155

APÊNDICE B - MAPAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO CONSIDERANDO A OBRA DO CANAL DO FRAGOSO FINALIZADA	159
APÊNDICE C – TABELAS RESUMO INDICANDO A REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO POR SUB-BACIA E REDUÇÃO DO VOLUME DE ESCOAMENTO ADOTANDO MICRORRESERVATÓRIOS SEM ORIFÍCIOS DE FUNDO PARA DIFERENTES TEMPO DE RETORNO	163

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade moderna, principalmente a urbana, tem ocorrido de forma desordenada, com elevados índices de crescimento demográfico, isento de qualquer planejamento, à custa de níveis, cada vez maiores, de poluição e de degradação ambiental. Como resultados desse cenário em desequilíbrio, verificam-se impactos significativos na infraestrutura urbana, especialmente relacionados com os recursos hídricos, como os sistemas de abastecimento de água, sistema de esgotamento sanitário e os sistemas de drenagem urbana (BRAGA et al., 2005).

A ocupação de áreas irregulares coloca essa população em uma efetiva situação de risco, tornando-a vulnerável a situações de desastres, e contribuem com a degradação do meio ambiente cresce cada vez mais. O problema de inundações está cada vez mais presente nos centros urbanos. O crescimento desordenado das cidades afeta diretamente o uso do solo, com sua consequente impermeabilização, aumentando o volume de água escoado. Este crescimento sem planejamento, aliado a mudanças climáticas cada vez menos previsíveis, tem piorado o panorama mundial de desastres ocasionados por enchentes. As enchentes ocorrem quando a precipitação é intensa e a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio é superior à sua capacidade de drenagem, resultando em inundações das áreas ribeirinhas (TUCCI, 2004).

Com a ocupação urbana na planície de inundação, o processo de extravasamento das águas do leito normal de um rio, que antes era considerado um fenômeno natural, acaba por se caracterizar como um desastre natural. Diante disso, a população, via de regra menos favorecidas, passa a sofrer consequências negativas, com prejuízos financeiros e sociais (CAMPIOLI; VIEIRA, 2019).

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).

A probabilidade das inundações costeiras vem aumentando no mundo, visto que essa parcela da população se encontra mais vulnerável aos possíveis impactos das mudanças climáticas. Até o ano de 2050 estimam-se prejuízos econômicos da ordem de US\$ 940 milhões de perdas médias anuais caso o nível do mar se eleve 20 cm nas 22 maiores cidades

costeiras da América Latina e Caribe, ultrapassando mais de US\$ 1 bilhão no caso de subida de 40 cm do nível do mar (ADAMS et al., 2014).

Diante desse contexto, tem-se a cidade de Olinda, com 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.

Nesse sentido, é necessária uma maior aproximação dos pesquisadores e dos órgãos públicos às populações vulneráveis, para um maior conhecimento das reais necessidades de cada local, melhor compreensão da drenagem local a fim de auxiliar na preparação da cidade para desafios futuros, fornecendo informações relevantes aos órgãos gestores para o desenvolvimento de estratégias e medidas adaptativas.

Assim, surge a necessidade de alternativas que solucionem ou reduzam os problemas relacionados ao aumento do escoamento superficial, não somente que os transfiram para outro local. Essas práticas envolvem o uso tanto de medidas estruturais e não estruturais, que têm sido adotadas para minimização dos danos gerados por inundação. As primeiras envolvem ações que atuam no escoamento da onda de cheia enquanto as segundas abrangem ações preventivas e de convivência com este tipo de evento hidrológico extremo. O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação constitui elemento fundamental para definição de medidas não estruturais, como planejamento do uso e ocupação do solo e, os planos de defesa civil. Este mapeamento pode ser desenvolvido empregando-se diferentes metodologias e instrumentos de apoio e subsidiam a reorganização do espaço urbano, uma vez que podem ser úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade (FRANK; PINHEIRO, 2003 & MOMO et al., 2016).

Para isso, o estudo se baseou nos resultados por meio de modelagem hidrológica, utilizando-se modelos matemáticos capazes de reproduzir o ciclo hidrológico e assim espelhar o escoamento superficial como consequência do evento chuvoso, com uso do modelo SWMM (Storm Water Management Model) desenvolvido pela “United States Environmental Protection Agency”(U.S EPA). A simulação hidrodinâmica também é relevante pelo fato de conseguir reproduzir o comportamento da propagação da vazão ao longo do corpo hídrico, com uso do modelo HEC-RAS 5.0.7 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos “US Army Corps of Engineers” (GOMES, 2019)

O presente trabalho busca, por meio da aplicação de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, contribuir com a gestão das águas pluviais urbanas para a bacia do Rio Fragoso em Olinda, que possui particularidades em seu território, com altas taxas de urbanização, maximizando os problemas de alagamentos, sendo necessário o fornecimento de informações que permitam a redução das magnitudes das inundações, minimizando seus impactos.

2 OBJETIVOS

Para se alcançar resultados e conclusões nessa pesquisa, estabeleceu-se os seguintes objetivos.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as inundações na cidade de Olinda em resposta a diferentes eventos de precipitação pluviométrica de intensidade média e elevada, na região da Bacia do Rio Fragoso.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar as características hidrológicas da região e as consequentes probabilidades de inundações;
- b) Analisar pontos críticos de alagamento, avaliando o efeito da urbanização no agravamento das enchentes;
- c) Construir e avaliar as manchas de inundação para diversos cenários de diferentes intensidades de precipitação pluviométrica;
- d) Propor alternativas de técnicas compensatórias visando à mitigação dos impactos da urbanização de toda a bacia sobre o escoamento ao longo do baixo curso do rio Fragoso.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DESENVOLVIMENTO URBANO

Desde a segunda metade do século XX, o crescimento dos núcleos urbanos tornou-se um fenômeno mundial, e a partir disso, a urbanização acelerada e ineficiente passou a ser um causador significativo de impactos ambientais que se evidenciam cotidianamente em cidades de todo o mundo (ALVES, 2017).

Atualmente, 55% da população mundial vive em áreas urbanas e a expectativa é de que esta proporção aumente para 70% até 2050, segundo a ONU - Organização das Nações Unidas (2019). Associado a estes fatores, a população mundial deve crescer em mais de 2,2 bilhões de pessoas até 2050, um aumento de 26% em relação aos 7,7 bilhões atuais. De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios com os indicadores de 2015 (PNAD,2016), a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas. Já 15,28% dos brasileiros vivem em áreas rurais.

A Grande Região com maior percentual de população urbana é o Sudeste, com 93,14% das pessoas vivendo em áreas urbanas. A Região Nordeste é a que conta com o maior percentual de habitantes vivendo em áreas rurais, 26,88%. O intenso processo de urbanização no Brasil gerou o fenômeno da metropolização (ocupação urbana que ultrapassa os limites das cidades) e, conseqüentemente, o desenvolvimento de grandes centros metropolitanos como São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Salvador, Recife, Goiânia, Manaus, entre outros.

Esta tendência de acréscimo populacional urbano apresenta-se como um dos fatores de preocupação, haja vista as problemáticas urbanas enfrentadas em diversas cidades do mundo como, por exemplo, o crescimento intenso de seu tecido urbano. Os impactos ambientais urbanos são frequentemente associados ao processo de urbanização rápida das pequenas, médias e grandes cidades (SOUSA, 2018).

Para o serviço de abastecimento de água, são representados 5.146 municípios, com população urbana residente de 173,2 milhões de habitantes, assegurando uma representatividade de 92,4% em relação ao total de municípios e de 98,1% em relação à população urbana do Brasil. Para esgotamento sanitário, a quantidade de municípios é de 4.050 e a população urbana residente de 164,1 milhões de habitantes, uma representatividade de 72,7% em relação ao total de municípios e de 92,9% em relação à população urbana do Brasil.

Os municípios brasileiros, cujos dados estão presentes no Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS,2019) em 2018, possuem 662,6 mil quilômetros de redes de abastecimento água, às quais estão conectados 57,2 milhões de ligações de água. Em termos de esgotamento sanitário, são 325,6 mil quilômetros de redes de coleta de esgoto, às quais se conectam 32,5 milhões de ligações de esgotos. Em 2018, verifica-se um crescimento dos sistemas brasileiros, na comparação com o ano de 2017, sendo detectadas 1,2 milhão de novas ligações na rede de água e 1,3 milhão na rede de esgotos, crescimentos que correspondem a aumentos de 2,1% e 4,2%, respectivamente.

A presente edição aponta um contingente de população urbana atendida com redes de água igual a 160,7 milhões de habitantes, o que representa um incremento SNIS de 701,5 mil novos habitantes atendidos, crescimento de 0,4%, na comparação com 2017. Quanto ao índice de atendimento, observam-se valores bastante elevados nas áreas urbanas das cidades brasileiras, com uma média nacional de 92,8%. Destacam-se as regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste, em que os índices médios são de 98,6%, 96,0% e 95,9%, respectivamente.

Com relação ao atendimento por redes de esgotos, o contingente de população urbana atendida alcança 105,5 milhões de habitantes, um incremento de 2,0 milhões de novos habitantes atendidos, crescimento de 1,9%, na comparação com 2017. Já o índice médio de atendimento é de 60,9% nas áreas urbanas das cidades brasileiras, destacando-se a região Sudeste, com média de 83,7%. Quanto ao tratamento dos esgotos, observa-se que o índice médio do país chega a 46,3% para a estimativa dos esgotos gerados e 74,5% para os esgotos que são coletados. Cabe ressaltar, que o volume de esgotos tratados foi de 4,18 bilhões de m³ em 2017 para 4,30 bilhões de m³ em 2018, correspondendo a um incremento de 2,9%.

O consumo médio de água no país, em 2018, foi de 154,9 litros por habitante ao dia, um aumento de 0,5% em comparação a 2016. Em 2018, os consumos variaram regionalmente de 115,4 l/hab/dia no Nordeste a 182,6 l/hab/dia no Sudeste. Por sua vez, ao distribuir água para garantir tal consumo, os sistemas sofrem perdas na distribuição, que na média nacional alcançam 38,5%, 0,2 ponto percentual acima do calculado em 2017.

Os serviços de água possuem problemas crônicos: preservação dos mananciais urbanos, perda de água na distribuição e falta de racionalização de uso da água em nível doméstico e industrial. O desenvolvimento urbano tem produzido um ciclo de contaminação, gerado pelos efluentes da população urbana, que são o esgoto doméstico/industrial e o esgoto pluvial. Esse processo ocorre devido a diversos fatores como o despejo sem tratamento dos esgotos sanitários nos rios; esgoto pluvial com transporte alto de poluição orgânica e de metais que atingem os rios especialmente nos períodos chuvosos; contaminação das águas

subterrâneas por despejos industriais e domésticos; depósitos de resíduos sólidos urbanos e ocupação do solo urbano sem controle do seu impacto sobre o sistema hídrico (TUCCI, 2008).

No Brasil pode-se estimar um valor anual superior a 2 bilhões de dólares de despesas e prejuízos com inundações. Do ponto de vista ambiental os impactos da urbanização são também significativos. A carga de poluição das águas pluviais, até recentemente tidas como relativamente limpas, mostra-se, na realidade bastante expressiva, sendo muitas vezes equivalente, e eventualmente superior às cargas poluentes dos esgotos sanitários.

O escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas em razão de dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados, apresentado nos tópicos seguintes.

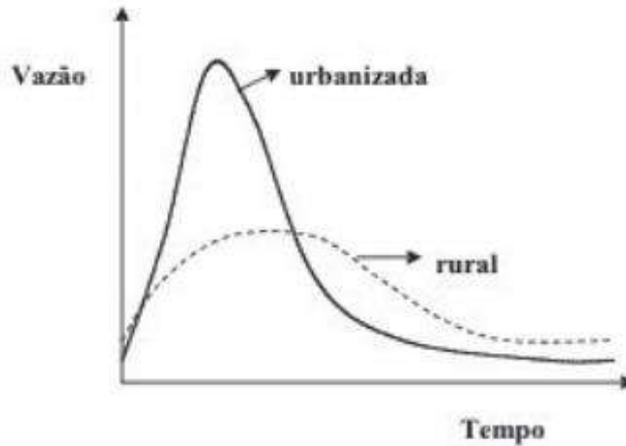
3.1.1 Inundações em razão da urbanização

São as inundações que ocorrem devido a ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento.

O desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido aumento significativo na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água. À medida que a cidade se urbaniza, em geral, cenários impostos são introduzidos:

- Aumento das vazões máximas (em até 7 vezes) (Figura 1) devido à impermeabilização das superfícies como também devido ao aumento da velocidade de escoamento por meio de condutos/canais.
- Elevação da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies, produção de resíduos sólidos (lixo).
- Degradação da qualidade da água, devido à lavagem das ruas, transporte de material sólido e às ligações clandestinas de esgoto doméstico e pluvial.
- Ausência de planejamento na implantação da infraestrutura, tais como: (a) pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento; (b) redução de seção do escoamento por aterros de pontes e para construções em geral; (c) deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixos e sedimentos; (d) projetos e obras de drenagem inadequadas, com diâmetros que diminuem a jusante, drenagem sem esgotamento, entre outros (TUCCI, 2008).

Figura 1 – Hidrograma de bacia rural e depois de urbanizada.



Fonte: Tucci, 2008

Costa *et al.* (2017) concluíram que a microbacia analisada em Goiânia possui diversos problemas ambientais decorrentes do processo de intensa urbanização ocorrido nas últimas décadas, em virtude da fragilidade das leis ambientais e de ordenamento urbano. A bacia foi alvo da expansão urbana desordenada, ausência de planejamento, uso e ocupação indevida dos fundos de vale, fragmentação da cobertura vegetal, impermeabilização excessiva dos solos, entre outros aspectos negativos.

A realidade adotada no Brasil para o controle de inundações nos centros urbanos, em sua grande maioria, ainda está baseada nos princípios higienistas, ou seja, é caracterizado pela rápida evacuação das águas pluviais, por meio de condutos dos locais caracterizados como “geradores” das inundações e alagamentos, que ainda persistem atualmente (CANHOLI, 2005).

A cada ano percebe-se que ocorre um aumento da frequência de eventos de inundação e alagamento em meio urbano. Este fato é agravado pela falta de controle do uso e ocupação do solo, bem como pela constante impermeabilização de áreas que passam a contribuir, durante eventos de chuva, com maior produção de escoamento superficial para as redes de drenagem e cursos de água existentes.

Boa parte das cidades brasileiras apresenta problemas de enchentes e inundações, sendo as das regiões metropolitanas aquelas que apresentam as situações de risco mais graves, decorrentes do grande número de núcleos habitacionais de baixa renda ocupando terrenos marginais de cursos d’água (BRASIL, 2007).

Como exemplo pode ser citado o estado de Minas Gerais, com número de habitantes atingidos maior que 55 mil e setescentos em 2020 segundo dados da Defesa Civil estadual. Na cidade de Belo Horizonte – MG, que enfrentou o maior volume de chuvas no mês de janeiro

de 2020 dos últimos 110 anos, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), sofrendo grandes impactos devido ao planejamento urbano da época em que se acreditava que se conseguiria canalizar o córrego e fazê-lo “desaparecer”. Segundo o Portal G1 de Notícias, cobrir rios para expandir o trânsito fez parte da estratégia de desenvolvimento de Belo Horizonte desde sua fundação há 122 anos. A topografia também favorece os alagamentos, visto que a capital está cercada de paredões de montanhas que fazem a água da chuva escoar para área urbana, esta água segue por canais e córregos em direção a outros rios. Um dos rios que recebe água dos córregos é o Arrudas, responsável pelas maiores enchentes deste ano. Ele tem trechos cobertos e outros não. Cada túnel fechado vira um funil, que não dá vazão a tanta água. A Figura 2 mostra a combinação de fotos que mostra a Avenida Prudente de Moraes, na Região Centro-Sul de Belo Horizonte, em imagem de outubro de 2018, e depois de ser destruída pelas chuvas.

Figura 2 – Destruição causada pelas chuvas na Avenida Prudente de Moraes em janeiro de 2020 – Belo Horizonte , MG



Fonte: Portal G1 de notícias, Janeiro/2020.

A cidade de São Paulo também sofreu com sérios problemas de alagamento em fevereiro de 2020, em que registrou 114 milímetros para um período de 24 horas. Semelhante a esta situação, em 1991, a cidade enfrentou um dia de precipitação histórica com 106 milímetros para o mesmo período de tempo. Porém, os problemas se repetiram em uma dimensão muito maior, com 5 números de mortes confirmados (Figura 3). Segundo o Portal de Notícias Exame Abril no início da década de 1990 o morador de São Paulo já sofria com alagamento das marginais Tietê e Pinheiros, por conta do transbordamento dos rios. Para especialistas, no entanto, o aumento populacional, a construção de prédios em terrenos antes desocupados e a falta de um planejamento a longo prazo colaboraram para a piora do quadro. Em 1991, o município de São Paulo tinha 9,6 milhões de habitantes. Hoje, na maior cidade do

país moram mais de 12 milhões de pessoas. Além disso, quase 30% dos prédios existentes em São Paulo foram construídos justamente nas últimas três décadas (IBGE, 2020).

Figura 3 – Alagamentos registrados após temporal em São Paulo – SP.



Fonte: Portal de Notícias Exame Abril, Fevereiro/ 2020.

As cheias urbanas são, portanto, um dos maiores problemas que precisam ser enfrentados pelas cidades. Seus prejuízos são inúmeros, afetando diversas faces da vida urbana, interferindo com os setores de habitação, transporte, saneamento, saúde pública, entre outros. A urbanização, por sua vez, é um elemento agravante de enchentes, o que realimenta este processo. Nesse contexto, torna-se fundamental a busca por soluções integradas, multidisciplinares e sustentáveis em longo prazo (REZENDE, 2013).

3.1.2 Inundações de áreas ribeirinhas

São inundações naturais que atingem a população que ocupa o leito maior dos rios. Essas enchentes ocorrem, principalmente pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos, exemplificado na Figura 4 .

Figura 4 – Características dos leitos do rio.



Fonte: Tucci, 2008

Essas condições ocorrem em razão das seguintes ações:

- No Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano das cidades, geralmente não existe nenhuma restrição quanto à ocupação das áreas de risco de inundação, a sequência de anos sem enchentes é razão suficiente para que empresários desmembrem essas áreas para ocupação urbana.
- Invasão de áreas ribeirinhas, que pertencem ao poder público, pela população de baixa renda.
- Ocupação de áreas de médio risco, de frequência menor, mas quando ocorre inundação sofrem prejuízos significativos (TUCCI, 2008).

A ocupação de áreas ribeirinhas também resulta na disposição inadequada dos esgotos cloacais, pluviais e resíduos sólidos, erosão e como consequência desses resultados a contaminação dos mananciais superficiais, subterrâneos, redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e inundações (NASCIMENTO, 2015).

Filho et al. (2017) analisaram a bacia do Córrego Lageado, e confirmaram o crescimento das áreas susceptíveis a inundações ribeirinhas com o aumento do tempo de recorrência das chuvas e com aplicação de eventuais cenários futuros de ocupação urbana, os quais trazem acréscimos nas áreas impermeabilizadas. Assim, chuvas com maior risco de ocorrência acarretam acréscimos percentuais mais evidentes para áreas marginais susceptíveis a inundação.

Silva et al. (2017) concluíram que as principais causas apresentadas relacionadas à inundação na região central de Boa Vista, Roraima, foram a falta de mata ciliar e a ocupação desordenada, invadindo a área de várzea do Rio Branco, responsável pela impermeabilização do solo e ocasionando o aumento do nível do rio. A forma como ocorreu o processo de urbanização sem acesso a direitos sociais e infraestrutura urbana contribui para risco ambiental urbano. Na avaliação dos impactos ambientais na forma quantitativa os estudos apresentaram um grau de impactos potenciais devido à ocupação indevida das áreas ribeirinhas, com um grau de 50%.

Gama et al. (2019), atentam-se para necessidade da atuação das autoridades públicas no devido planejamento urbano na cidade de João Monlevade - MG, de modo a controlar e fiscalizar as construções em locais inapropriados, como próximas a cursos d'água, a fim de evitar transtornos de ordem social, ambiental e econômica. A classificação quanto ao grau de risco mostra que se deve atentar ao setor onde o índice de ocorrência de enchentes e inundações é considerado alto, sendo necessário adotar medidas de controle estruturais para mitigar o problema. Assim como nos locais onde o índice é considerado médio.

3.2 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

A partir da década de 60, em diversos países, iniciaram-se questionamentos sobre a drenagem urbana tradicional que, por intermédio de obras destinadas a retirar rapidamente as águas acumuladas em áreas importantes, transfere o problema para outras áreas ou para o futuro. Sob esta concepção são desenvolvidos projetos de grandes sistemas de galerias pluviais, ações para melhor escoamento de fluxo em rios e canais, concretizadas através de cortes de meandros, retificações, impermeabilização e mudanças de declividade. Esta visão que ainda predomina em alguns meios técnicos, focaliza o controle do escoamento na própria calha do curso d'água, dando pequena importância à geração do escoamento nas superfícies urbanizadas (POMPÊO, 2000).

Visto que as soluções convencionais de drenagem se tornaram insuficientes frente ao intenso desenvolvimento urbano, surgiu a necessidade de soluções alternativas para lidar com as águas pluviais urbanas que aplicassem as chamadas técnicas compensatórias. Essas técnicas baseiam-se na compensação dos efeitos da urbanização nos processos hidrológicos através da retenção e infiltração das águas precipitadas e podem compor uma solução de baixo impacto para a drenagem urbana.

Nos últimos anos, foram introduzidas várias concepções diferentes para o projeto de um sistema de drenagem integrado com o desenvolvimento da cidade, buscando reduzir impactos sobre o ciclo hidrológico, atuando nos processos de infiltração e permitindo a detenção em reservatórios urbanos artificiais, juntando as preocupações, restrições e sinergias da Engenharia Hidráulica e do Urbanismo, foram propostas, com algumas pequenas diferenças entre elas. As planícies de inundação passaram a ser objeto de planejamento, sofrendo restrições quanto à ocupação e ao tipo de obras, visando principalmente a garantir a área da seção de escoamento e a minimizar as perdas de carga hidráulica em decorrência de edificações nestas áreas. Todas, entretanto, tendem a considerar o problema de forma integrada, tentando resgatar as características naturais do ciclo hidrológico, enquanto agregando valor à própria cidade. (REZENDE, 2013).

Diante desse contexto surge o conceito de drenagem urbana sustentável que pode ser definida como um conjunto de medidas que visam a manter as condições pluviais de uma região urbana próxima, ou igual, à que existia antes da sua ocupação e que permita a recuperação ambiental de ambientes anteriormente degradados (CHRISTOFIDIS, 2010).

Identifica-se também o uso do termo drenagem sustentável como: “sistemas de drenagem precisam ser concebidos no intuito de minimizar impactos da urbanização sobre os

padrões naturais de escoamento, combinando aspectos quantitativos e qualitativos, alcançando objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no espaço e no tempo” (MIGUEZ, 2010).

Esta nova visão integrada teve início na década de 1980 nos Estados Unidos, com o uso das chamadas Best Management Practices (BMPS) – Melhores Práticas de Gestão, que corresponde ao conjunto planejado de ações na bacia hidrográfica buscando a garantia da disponibilidade e qualidade das águas pluviais (AMEC, 2001). Observa-se a evolução das BMP’s para o Desenho e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto Ambiental (DDUBI) que tem sido proposto e aplicado em vários países e cidades do mundo, com vistas a reconduzir as cidades e aglomerados urbanos aos caminhos da sustentabilidade, contribuindo no sentido de aumentar a resiliência desses espaços aos impactos das mudanças climáticas e seus desdobramentos. O DDUBI é uma proposta mais abrangente e envolve as práticas da gestão participativa, diminuição da queima de combustíveis fósseis com a melhoria da mobilidade urbana, geração de emprego e renda em escala local. Além disso, conta com uma série de infraestruturas verdes (Krüger & Dziedzic, 2010; Rossi & Sousa, 2012)

Outros conceitos surgem, como o LID – Low Impact Development – um dos termos usualmente adotados na Nova Zelândia e nos Estados Unidos para denotar um conjunto de práticas para o desenho e desenvolvimento de áreas urbanas. Fletcher et al. (2014) menciona que o termo aparentemente foi utilizado pela primeira vez por Barlow et al. (1977) em um relatório sobre planejamento do uso do solo em Vermont nos Estados Unidos. A abordagem tem sido difundida como estratégia de gerenciamento de águas pluviais para manter a hidrologia local e mitigar impactos adversos ao escoamento superficial e à poluição difusa. (NUNES, 2017 & AMANTHEA, 2015).

Ideias semelhantes foram sendo desenvolvidas ou adaptadas em outros países como SUDS (“*Sustainable Urban Drainage Systems*”) no Reino Unido, WSUD (“*Water Sensitivity Urban Design*”) na Austrália, e LIUDD (“*Low Impact Urban Design and Development*”) na Nova Zelândia.

O SUDS é um conjunto de técnicas sustentáveis usadas na gestão das águas pluviais como uma alternativa aos sistemas tradicionais (LOURENÇO, 2014). O principal objetivo é promover benefício as vazões de escoamento, como por exemplo controlar a qualidade de água pluvial, prevenindo a poluição; controlar os riscos de inundações; manter o ciclo natural da água; melhorar o ambiente para os indivíduos e manter lugares melhores na natureza. Esses sistemas de drenagem podem ser desenvolvidos para melhorar o desenho urbano e a gestão de

riscos ambientais, assim como promover a melhoria do ambiente construído (RICARDO, 2016 & RAMOS, 2018).

A evolução contínua de todos esses conceitos e a procura por novas soluções para os sistemas de drenagem urbana levaram também ao conceito cujo termo em inglês é Water Sensitive Urban Design, ou, simplesmente, WSUD, inicialmente desenvolvido na Austrália. O Projeto Urbano Sensível à Água (WSUD) é apoiado por um valor subjacente da prestação de serviços urbanos de água de maneira a considerar as oportunidades e limitações específicas do local. Um desenvolvimento para fornecer serviços de água de maneira a proteger e aprimorar a integridade hidrológica e ecológica local. O WSUD considera todos os aspectos do ciclo urbano da água como um recurso valioso. A incorporação do WSUD em empreendimentos urbanos também pode melhorar a resiliência das captações convencionais de abastecimento de água devido a possíveis impactos das mudanças climáticas. (REZENDE 2013 & SHARMA, 2016)

WSUD é visto como um componente da Gestão Integrada da Água Urbana (IUWM). A IUWM promove uma abordagem de planejamento coordenado para os serviços de água potável, águas residuais e águas pluviais que leva em consideração as implicações mais amplas do desenvolvimento sustentável, incluindo: demanda de energia, emissões de gases de efeito estufa, geração de resíduos sólidos, perdas de nutrientes, custos de ciclo de vida e aceitação pela comunidade. Os sistemas WSUD também são conhecidos como sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS) no Reino Unido, melhores práticas de gerenciamento de águas pluviais (BMPs) e desenvolvimento de baixo impacto (LID) nos EUA, e está amplamente representada no termo infraestrutura verde (SHARMA, 2016).

No LIUDD, além das premissas estabelecidas no WSUD, há referência clara aos processos participativos de tomada de decisão, envolvendo políticas de disseminação de hábitos pessoais que possam diminuir a pressão sobre a água enquanto recurso natural. Integra também a gestão das “três águas” dentro dos limites da bacia hidrográfica em escala local, visando a redução e contenção de contaminantes, restaurar, melhorar e proteger a população nativa (de valor social, cultural e histórico) e a biodiversidade (terrestre e aquática), reduzir as necessidades de mobilidade (pessoas e materiais) (BATISTA, 2014).

Mais recentemente, as ações de revitalização em rios urbanos também surgem como uma nova possibilidade de minimização de cheias. A revitalização de rios geralmente inclui soluções para o ambiente construído, reconectando os rios à cidade, mas não necessariamente recupera as suas características naturais. O conceito de reabilitação ou requalificação de um rio, no entanto, tenta integrar hidrologia, morfologia, riscos hidráulicos, qualidade das águas e

do estado ecológico do rio, o que é uma proposta bastante complexa em ambientes urbanos (REZENDE,2013).

Em diversos lugares no mundo, as cidades sofrem problemas de inundação, em sua grande maioria pela ausência de planejamento e crescimento desordenado, acarretando em prejuízos materiais e imateriais. É preciso repensar a relação das cidades com as águas. Pensando numa relação onde as cidades absorvem a água da chuva e permitem que a água siga seu fluxo natural, criando zonas úmidas, solos permeáveis e margens de rios restauradas, criou-se o conceito de cidades esponjas, com alguns exemplos a seguir.

A China, que viveu intenso processo de urbanização nos últimos anos, passou a ser um dos países que abraçou com mais força o conceito de cidade-esponja. Em Taizhou e Jinhua, por exemplo, muros de concreto que canalizavam rios foram demolidos e substituídos por parques. A cidade chinesa de Lingshui, no extremo sul do país, é uma das que trocaram as tradicionais tubulações de drenagem por estruturas conhecidas como “*bioswales*” que podem ser entendidas como valas de drenagem ecológicas. São pequenos canais de infiltração natural, com vegetação nativa, que correm paralelamente a ruas, avenidas e calçadas (MÉDICI; MACEDO, 2020).

O conceito de cidades-esponja foi iniciado na China no final do ano de 2014, cujo o objetivo é que 20% das áreas urbanas possam absorver e armazenar 70% da água pluvial. O objetivo é menos asfalto, menos concreto e mais lagos, mais parques, em busca de uma infraestrutura que retém, limpa e drena a água. Wuhan, é uma das primeiras cidades a lançar o projeto “cidades esponja”, por meio do Programa Wuhan Sponge City em busca da gestão integrada das águas, drenagens especiais, áreas verdes e ações para restaurar a capacidade de absorção, infiltração e armazenamento nas cidades. Foi construído o Garden Expo Park, com uma área de cerca de 30km², que coleta a água da chuva utilizando concreto permeável, conseguindo reter até 70% da água da chuva. O sucesso do parque incentivou o governo a construir projetos semelhantes, além de diversos benefícios, como: redução da poluição transportada, criação de novos empregos, melhora da qualidade de água (MACIEJEWSKA,2020).

O novo centro de Changde, também localizado na China, terá ruas com canais – os chamados “eco-boulevards” – que permitem que a água das enchentes flua naturalmente pela cidade sem afetar o cotidiano. As construções de alta densidade ficarão concentradas em terrenos um pouco mais elevados nesta bacia. Espera-se que os projetos melhorem a qualidade das águas, recuperem os rios e diminuam a frequência de inundações (MACIEJEWSKA,2020).

Berlim, na Alemanha, vem tomando diversas medidas com o objetivo de se tornar mais resistente e habitável diante das mudanças climáticas esperadas nos próximos anos e décadas. O foco é evitar a impermeabilização demasiada da superfície do solo com concreto ou asfalto, tornando as superfícies permeáveis a água, sendo exemplo as áreas de estacionamento e faixas medianas que podem ser repavimentadas para permitir a absorção de água pelo solo. Assim como, reter as águas pluviais na própria paisagem urbana, de modo que parte dela evapore e o restante seja escoado gradualmente, em vez de um escoamento bruto para os rios e lagos. Contribuem para evitar inundações do subsolo e dos sistemas de esgoto, também protegendo a qualidade das águas, visto que o escoamento rápido carrega os resíduos sólidos urbanos e a poluição difusa que quando escoados para os lagos, podem matar os peixes devido à sobrecarga de nutrientes e o esgotamento do oxigênio da água (ZIMMERMANN, 2020).

Frederiksberg, na Dinamarca, criou um sistema capaz de “amortecer” grandes volumes de água para, em seguida, dispersá-los de maneira segura. Uma das iniciativas foi colocada em prática na praça Langelands, ponto mais alto da cidade e local a partir de onde a água da chuva corre para Copenhague. Em 2019, a praça, com área de 3 mil metros quadrados, ganhou um material fibroso (stone wool) que funciona como uma esponja e libera a água de maneira lenta. A cada litro de água despejado, o material pode absorver até 950ml (PORTAL SCANDINAVIANWAY, 2020).

Viborg, a cerca de 330km da capital dinamarquesa, transformou uma área ampla em estrutura anti-inundação – e também em local de lazer para os moradores. Próxima da região central, até poucos anos a área era utilizada para os treinos de um clube de futebol local. Com o projeto, o terreno, pantanoso, que costumava alagar com facilidade, foi adaptado para servir como barragem. O lago Sonderso, que já existia no local, agora tem em torno dele um terreno ondulado, com áreas de transbordamento. Assim, a depender do volume de chuvas, a área ocupada pela água cresce. Em temporadas mais secas, ilhas submersas reaparecem e servem como local de passeio e reunião de famílias (PORTAL SCANDINAVIANWAY, 2020).

Copenhague também tem adotado técnicas que a incluem entre as cidades-esponja. Em espaços públicos como o parque Tåsinge Plads, os canteiros se enchem de água e esperam a drenagem até o escoamento da tempestade. Em paralelo, estruturas em formato de guarda-chuvas de cabeça para baixo coletam a chuva que mais tarde servirá para irrigar a vegetação (Figura 5). As águas pluviais são direcionadas para tanques subterrâneos, e até as brincadeiras infantis na superfície estão previstas no projeto: corridas e pulos das crianças nos painéis que ficam no chão bombeiam a água pelos canos (PORTAL SCANDINAVIANWAY, 2020).

Figura 5 – Adaptação do parque Tåsinge Plads



Fonte: Climate and Urban Spaces (2020)

Chicago, Illinois, EUA, tem como principais problemas a chuva e a neve, que devem aumentar em 40% até 2100. Uma solução está sendo testada: a pavimentação permeável. A chuva e a água derretida são absorvidas por rochas porosas em que os micróbios integrados removem os poluentes. A água limpa é então direcionada para as estações próximas ou retornadas para o Lake Michigan, e 80% da precipitação é desviada do sistema de esgoto da cidade. A “via verde” mais ambiciosa até agora tem um comprimento de 3,2 quilômetros (URBAN HUB, 2018).

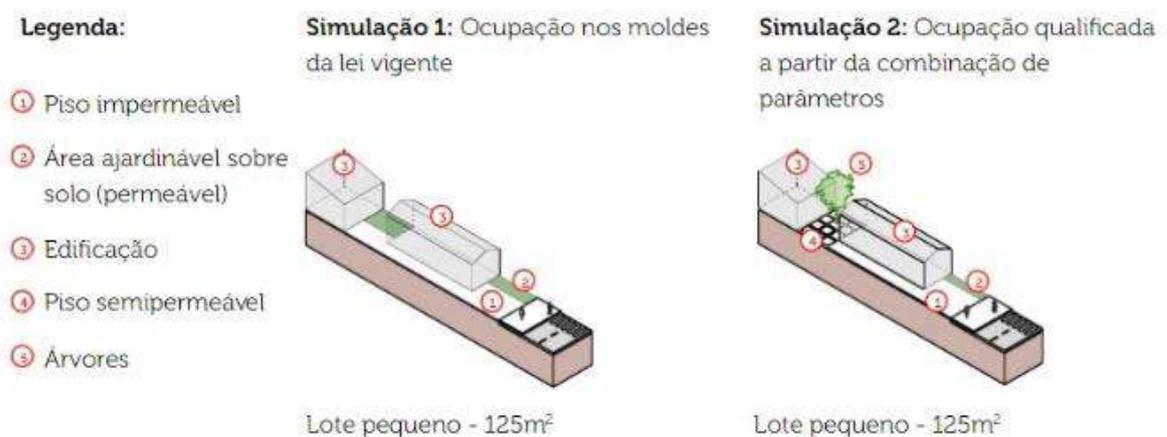
Roterdã, na Holanda, está quase 7 metros abaixo do nível do mar. A cidade já conta com um sistema impressionante de diques, além da barreira contra tempestades de proporções gigantescas. Autoridades municipais agora embarcaram em um megaprojeto de vários anos que incorpora o fortalecimento dessas soluções “radicais”. Mas o Programa de Proteção Climática de Roterdã também conta com uma série completa de medidas menos radicais, como a proteção dos pântanos e a plantação de mais árvores e outras plantas. As praças de água são outra medida que temporariamente coleta o escoamento da água de tempestade do ambiente construído nas adjacências. A praça de água Benthemplein, por exemplo, consegue armazenar 1.800 m³ de água (URBAN HUB, 2018).

DaNang, Vietnã, tem um programa de moradia resistente a enchentes que oferece linhas de crédito e empréstimos para que famílias mais carentes possam reformar suas casas ou construir casas resistentes a alagamentos. Surat, Índia, criou um sistema de alerta precoce de ponta para alertar os moradores sobre enchentes iminentes, evitando assim o pânico quando pessoas vão para um local mais elevado (URBAN HUB, 2018).

No Brasil, o município de São Paulo instituiu a quota ambiental, um conjunto de regras de ocupação que fazem com que cada lote na cidade contribua com a melhoria da qualidade ambiental, sendo que tais regras passam a incidir quando se pretender uma nova edificação ou a reforma de um edifício existente. Na concepção da quota ambiental se optou por adotar parâmetros relacionados à drenagem, microclima e biodiversidade, com intuito de promover melhoria da drenagem e redução das ilhas de calor com atenção à biodiversidade, ainda que tais parâmetros não abranjam a totalidade dos problemas ambientais existentes na cidade. Propõe-se a adoção de medidas não estruturais no âmbito do lote, minimizando a contribuição de águas pluviais para as estruturas de macrodrenagem adotando-se uma abordagem mais sistêmica.

Cada lote/empreendimento deve atingir uma pontuação mínima que está relacionada à drenagem e microclima/biodiversidade. A pontuação mínima varia conforme a localização na cidade (perímetros de qualificação ambiental) e conforme a dimensão do lote (quanto maior o terreno, maior a pontuação). Identificada a pontuação mínima a ser atingida, os parâmetros a serem aplicados para obtenção de pontos podem ser combinados de forma cumulativa (vários num mesmo lote) ou alternativa (escolha de um ou outro parâmetro), a partir de um “cardápio” de opções pré-estabelecido. E cada parâmetro tem um desempenho em relação à melhoria da drenagem e à atenuação do microclima. Por exemplo, árvores pontuam bem mais do que pisos semi-permeáveis; vegetação arbustiva pontua mais do que fachada verde, e assim por diante. A Figura 6 mostra um exemplo de adaptações à quota ambiental (SMUL, 2020).

Figura 6 – Exemplo de uma edificação antes e depois das mediadas da quota ambiental em São Paulo.



Fonte: Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento (SMUL) – Prefeitura de São Paulo

Outro exemplo de utilização de tipologias da infraestrutura verde no planejamento urbano são as leis que incentivam ou obrigam a criação de telhados verdes em edificações, denominadas “Leis do Teto Verde”, como no caso dos municípios de Blumenau (SC) e Recife (PE), entre outros. No caso de Blumenau, não há a obrigatoriedade de inserção do telhado verde nas novas edificações; o incentivo se dá por meio da exclusão dessa área no cálculo da área computável da edificação e da sua contabilização para o cálculo da área permeável.

Já no Recife, ocorre a determinação para que novas edificações habitacionais multifamiliares acima de quatro pavimentos ou não habitacionais com área maior que 400m² prevejam a implantação de telhado verde para que sejam aprovadas. Além disso, o município torna obrigatória, em lotes com mais de 500m², edificados ou não, e que possuam mais que 25% área impermeabilizada, a construção de reservatórios de águas pluviais, os quais podem ser para acumulação de água para reúso, ou para retardo das águas pluviais e posterior lançamento no sistema de drenagem da cidade (RECIFE, 2015; BÊRREDO, 2019).

Além das leis que incentivam a implantação de telhados verdes, há aquelas que oferecem benefícios fiscais às edificações que apresentarem medidas que promovam a redução dos impactos ambientais. Os benefícios são concedidos na forma de desconto no valor do Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU) e, por isso, essas leis são conhecidas como “Leis do IPTU Verde”. Na cidade de São Carlos (SP), a lei nº13.692, de 2005, que trata do IPTU, concede descontos de até 2% para imóveis que possuam árvores na calçada ou área permeável (BÊRREDO, 2019).

Em Vitória (ES), desde 2016 está em vigor a lei nº 8.947, que diz respeito à Política de Eficiência Energética e Sustentabilidade do município. A lei descreve como estratégias para alcançar a eficiência energética e a sustentabilidade o uso racional dos recursos hídricos, a ampliação de áreas verdes e a utilização de sistemas sustentáveis nas edificações, como captação de águas pluviais e reutilização das águas. Do ponto de vista hídrico e da vegetação, tipologias da infraestrutura verde podem ser utilizadas para atender às estratégias dessa lei, como o telhado verde, reservatórios de água e cisternas e canteiros de chuva, além da própria arborização. O benefício concedido às edificações consiste no desconto, por período determinado, no valor do IPTU (BÊRREDO, 2019).

A cidade de Salvador (BA) instituiu o programa de certificação IPTU Verde, que concede redução de até 10% no valor do imposto mediante o atendimento a práticas sustentáveis, por meio do decreto nº29.100, de 2017. A adesão ao programa abrange edificações de uso residencial, comercial, industrial, institucional e misto e ocorre de forma opcional. Segundo o site institucional do programa, cada ação sustentável atendida garante

uma pontuação e por meio da soma dos pontos obtém-se um nível de certificação – bronze, prata ou ouro. Dentre as ações, destacam-se a implantação de telhado verde, utilização de pavimento permeável, construção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais, plantio de espécies vegetais nativas para sombreamento da calçada (BÊRREDO, 2019).

A cidade de Porto Alegre (RS) implantou reservatórios de retenção a céu aberto. São reservatórios secos, que armazenam água apenas durante eventos de chuva e podem ser construídos com fundo impermeabilizado, quando há risco de contaminação de águas subterrâneas pelas cargas elevadas de poluentes. Impermeabilizações em concreto podem desempenhar outros tipos de funções, como a implantação de quadras de esportes e áreas de lazer, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Reservatório de retenção a céu aberto na cidade de Porto Alegre (RS)



Fonte: Soluções para cidades (2013)

De um modo geral, essas técnicas utilizam medidas de gerenciamento de escoamento distribuído que buscam controlar as águas pluviais reduzindo a impermeabilidade e a retenção, infiltrando e reutilizando águas pluviais no local de desenvolvimento onde é gerado.

3.3 MEDIDAS DE CONTROLE DAS CHEIAS URBANAS

No planejamento da drenagem urbana, o conjunto de medidas que visa reduzir a frequência e mitigar os danos causados pelas inundações e alagamentos são classificados, segundo sua natureza, em medidas estruturais e não-estruturais.

As medidas estruturais representam interferências nas características do escoamento. Estas são responsáveis pelo direcionamento e controle do fluxo das águas pluviais, atribuindo novas estruturas e fazem uso da implantação de obras que modificam o sistema natural para a retenção ou contenção do escoamento, como, por exemplo, a construção de reservatórios, diques e canalizações abertas e fechadas.

As medidas estruturais de controle na fonte são aquelas que apresentam a nova visão de convivência com as cheias urbanas, propondo a redução e o tratamento do escoamento superficial gerado pela urbanização. O papel das medidas estruturais de controle na fonte é o de proporcionar soluções para a retenção, infiltração e abatimento do escoamento superficial. Os sistemas de drenagem mal projetados acabam por acelerar o escoamento e conduzem rapidamente os volumes de escoamento aos grandes canais fluviais. As medidas estruturais de controle na fonte visam retardar e reduzir o escoamento com a ajuda dos dispositivos de controle, canalizações bem dimensionadas e estruturas de retenção dos deflúvios.

As medidas não estruturais são medidas de caráter legal e institucional e que procuram disciplinar a urbanização de tal forma a minimizar os seus efeitos no regime hídrico das bacias. Estas procuram, sem alterar a morfologia, reduzir os impactos com a aplicação de medidas e princípios que visam reduzir o risco hidrológico e a interferência causada por ações antrópicas às condições naturais. As medidas incluem ações como o zoneamento das áreas de inundação, previsões de cheias, seguros de inundações, legislação pertinente e sistema de alerta a inundações. Este último envolve o monitoramento e um sistema de previsão hidrológica. Sua efetividade depende da participação da população e da fiscalização constante do crescimento da cidade e da ocupação de áreas de forma irregular (SMDU, 2012).

3.3.1 Medidas estruturais

➤ Reservatórios de lote

Os reservatórios de lote são reservatórios de detenção de pequeno porte localizados em lotes urbanizados e que atuam de forma distribuída na bacia, possibilitando a recuperação da capacidade de amortecimento perdida devido à impermeabilização. Ao armazenar as águas da chuva, contribuem para retardar uma parcela do escoamento e assim atenuam as vazões máximas de saída.

Segundo Baptista (2011), o uso dos reservatórios individuais é crescente no Brasil, sendo previsto, recomendado ou obrigatório na legislação de diversos municípios brasileiros,

como Belo Horizonte, Porto Alegre, São Paulo, entre outros. No intuito de reduzir prejuízos provocados pela enchente, São Paulo promulgou a lei municipal 13.276/2002 em 04/01/2002 que torna obrigatória a execução de reservatórios para as águas coletadas por coberturas e pavimentos nos lotes, edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 500 m². Batizada de “lei das piscininhas” remete ao sistema utilizado em algumas cidades da Europa. A obrigatoriedade vale para todas as construções novas e é exigência para obtenção do Certificado de Conclusão ou Auto de Regularização.

O estado de Pernambuco dispõe da Lei nº 14572 / 2011, que estabelece normas para o uso racional e reaproveitamento das águas nas edificações, com objetivo de incentivo a medidas necessárias à conservação, à redução do desperdício e à utilização de fontes alternativas para a captação e o aproveitamento da água nas edificações. Ficam isentos das regras previstas nesta Lei os projetos de edificações e de reformas de imóveis residenciais e não residenciais inferiores a 70 m² (setenta metros quadrados); e os projetos de edificações e de reformas já aprovados até a data de entrada em vigor desta Lei.

O município de Recife em Pernambuco, possui a Lei nº 18112/ 2015 que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Segundo o artigo 3º, em lotes com área superior a 500 m² (quinhentos metros quadrados), edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 25% (vinte e cinco por cento) da área total do lote deverão ser executados reservatórios de águas pluviais como condição para aprovação de projetos iniciais.

Essas estruturas de amortecimento são tanques, geralmente pré-fabricados, ou estruturas em alvenaria, concreto, a céu aberto ou enterrados, instalados ao ar livre ou, ainda, dentro de uma edificação, conectados ou não ao sistema de drenagem.

Dentre as vantagens dessa técnica é a utilização da água para outras finalidades além do controle das cheias, como a irrigação de jardins, descarga de vasos sanitários, lavagens de pisos e automóveis. Em relação às desvantagens, têm-se a necessidade de manutenção, com obrigações atribuídas ao usuário.

➤ Microrreservatórios (Barris de chuva e Cisternas)

Os microrreservatórios têm a função de colher a água da chuva para reutilização. Podem ser tanto os chamados barris de chuva quanto as chamadas cisternas ou ‘piscininhas’.

Os barris de chuva são estruturas colocadas fora da edificação, próximas à descarga de calhas do telhado, para armazenar o escoamento da cobertura para uso posterior na rega do gramado e jardim. As cisternas permitem o armazenamento da água da chuva em volumes significativamente maiores em tanques fabricados ou em áreas de armazenamento subterrâneo (PEREIRA, 2019).

Tais dispositivos são eficientes, de baixo custo e fácil manutenção aplicáveis a localidades residenciais, comerciais e industriais, os quais operam retendo volumes pré-determinados de escoamento do telhado, armazenam permanentemente para um volume de projeto, reduzindo o escoamento superficial, retardam e diminuem o pico de vazão. Uma tubulação de extravasamento providencia detenção através da capacidade de retenção do barril de chuva, com a vantagem de reuso destas águas, as quais podem ser empregadas para usos menos nobres, como rega dos jardins ou lavagem das áreas impermeáveis da edificação (SOUSA, 2005).

O uso dos microrreservatórios está sujeito a algumas restrições, tais como disponibilidade de espaços livres, profundidade da rede coletora principal, declividades dos lotes, nível de lençol freático e deposição de resíduos sólidos. No entanto, estudos tem mostrado que sua eficiência é alta na redução de vazões máximas e na melhoria da qualidade do efluente pluvial (Andrade Filho et al., 2000).

O principal critério para adoção desta técnica é a disponibilidade de espaço para a instalação do reservatório.

➤ Bacia de detenção

A bacia de detenção é uma estrutura que tem por objetivo regular as vazões pluviais efluentes de uma bacia hidrográfica. A infiltração não é o aspecto principal da bacia e sim a detenção do escoamento, permitindo a transferência de vazões compatíveis com o limite tolerado pela rede de drenagem ou curso d'água existente. As bacias de detenção podem ser construídas de várias formas e com tipos de funcionamento variados (BAPTISTA, 2005). Alguns autores chamam de bacia de retenção quando a bacia é projetada para não esvaziar totalmente e reter uma parte da água criando um pequeno lago.

Além de reduzir o escoamento superficial, diminuir a vazão de pico, os reservatórios de detenção liberam a água de forma controlada, assim como contribuem para retenção de sólidos suspensos que seriam carreados para os rios e riachos.

Normalmente estes tipos de bacias operam com os dispositivos de descarga de fundo fechados durante o evento de chuva, para depois do período de decantação dos sólidos drenar a água até uma estação de tratamento ou ao meio natural dependendo da carga de poluentes presentes. Como parte da manutenção, os sedimentos depositados devem ser removidos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015)

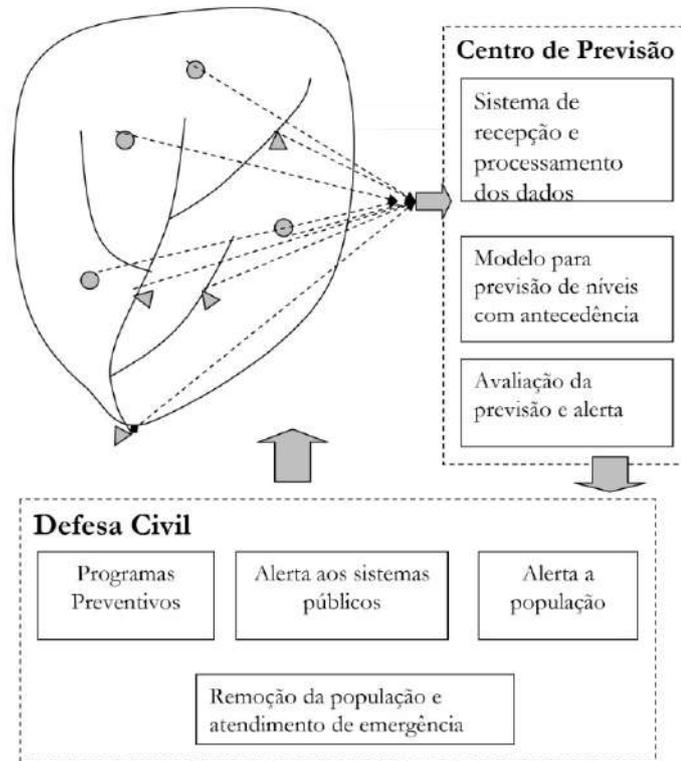
No Brasil, a partir dos anos 90, notou-se o emprego das bacias de detenção em diversas áreas metropolitanas brasileiras, tais como Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Belo Horizonte. Atualmente, tais estruturas buscam a integração com projeto urbanístico local, incluindo-se a implantação de áreas verdes e de ambientes propícios ao desenvolvimento da fauna e da flora, criação de espaços de lazer, implantação de áreas destinadas à prática de atividades esportivas, valorização da presença da água no meio urbano, entre outros (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2015).

3.3.2 Medidas não estruturais

➤ Sistema de previsão e alerta

Segundo Tucci (2005), esses sistemas visam à antecipação da ocorrência da enchente a fim de informar a população e adotar as medidas cabíveis para diminuir os possíveis prejuízos socioeconômicos. Eles funcionam a partir da coleta e transmissão de informações em tempo real, por telemetria, para um centro de previsão, que avalia a situação com auxílio de um modelo de previsão de vazões e níveis e, em função das condições encontradas, transmitem o alerta e acionam a Defesa Civil, que deve aplicar seus planos emergenciais. Na Figura 8 é possível visualizar o funcionamento dos sistemas de previsão e alerta.

Figura 8 – Funcionamento do sistema de previsão e alerta.



Fonte: TUCCI (2005)

➤ Zoneamento das áreas de inundação

Dentre as técnicas não estruturais mais difundidas destaca-se o zoneamento de áreas inundáveis, sendo uma alternativa viável financeiramente e útil nos estudos de risco. Segundo Tucci (2005) o objetivo principal do zoneamento consiste em disciplinar a ocupação do solo visando minimizar o impacto devido as inundações. A metodologia consiste em definir faixas onde são definidos condicionantes desta ocupação, sendo elas:

a) passagem de inundação: a área pode ser utilizada desde que não obstrua o escoamento e que a inundar não sofra prejuízos humanos e materiais significativos; usos potenciais: agrícola, parques, estacionamentos, banhados e áreas ambientais, serviços.

b) zona com restrição: área restante da superfície inundável que deve ser regulamentada; usos potenciais: parques e atividades recreativas ou esportivas cuja manutenção, após cada cheia, seja simples e de baixo custo; uso agrícola, habitação com mais de um piso, onde o piso superior ficará situado, no mínimo, no nível do limite da enchente e estruturalmente protegida contra enchentes; industrial, comercial, como áreas de carregamento, estacionamento, áreas de armazenamento de equipamentos ou maquinaria

facilmente removível ou não sujeitos a danos de cheia, não sendo permitido armazenamento de artigos perecíveis e principalmente tóxicos; serviços básicos: linhas de transmissão, estradas e pontes, desde que corretamente projetados.

c) zona de baixo risco: pequena probabilidade de inundar, mas necessita regulamentação para a convivência da população com as enchentes, na eventualidade dessas cotas serem atingidas.

Para a realização do mapeamento de inundações comumente são utilizados modelos matemáticos hidráulicos 1D e 2D (conceituais ou empíricos) para representar fenômenos envolvidos de ordem hidráulica, os quais determinam a cotas (1D e 2D) e as áreas inundadas (2D) (MONTE,2016).

Antigamente as várzeas faziam o controle natural da água, pois o solo ribeirinho estava preparado naturalmente para ser inundado nas épocas de cheia, absorvendo boa parte da água que transbordava, além de utilizar seus nutrientes. Hoje as inundações ribeirinhas avançam pelo leito maior dos córregos e rios, normalmente delimitado por cheias da ordem de 100 anos de recorrência. Com a ocupação urbana já estabelecida, seja por habitações, para recreação, para uso agrícola, comercial ou industrial, suas vias e edificações tornam-se fadadas a prejuízos potenciais. Isto justifica a importância da delimitação prévia de zonas inundáveis adjacentes aos córregos, como um instrumento de utilidade no planejamento urbano (OLIVEIRA,2016; FILHO, 2017).

Dessa maneira, medidas para o zoneamento de áreas inundáveis são essenciais para o planejamento de municípios que se desenvolvem junto aos rios, pois amenizam os danos recorrentes das inundações. Além disso, os mapas de inundação subsidiam a reorganização do espaço urbano, uma vez que podem ser úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade (OLIVEIRA,2017).

➤ Educação ambiental

A partir da Conferência Intergovernamental sobre Educação Ambiental realizada em Tsibilisi (EUA), em 1977, inicia-se um amplo processo em nível global orientado para criar as condições que formem uma nova consciência sobre o valor da natureza e para reorientar a produção de conhecimento baseada nos métodos da interdisciplinaridade e nos princípios da complexidade. Na Rio 92, o Tratado de Educação Ambiental para Sociedades Sustentáveis e Responsabilidade Global coloca princípios e um plano de ação para educadores ambientais, estabelecendo uma relação entre as políticas públicas de educação ambiental e a

sustentabilidade. Enfatizam-se os processos participativos na promoção do meio ambiente, voltados para a sua recuperação, conservação e melhoria, bem como para a melhoria da qualidade de vida (JACOBI, 2003).

A questão ambiental tem estado mais presente no cotidiano das pessoas, proporcionando uma nova visão do mundo em que vivemos. Essa conscientização vem sendo alcançada nos mais diversos ambientes, através de ações de educação ambiental, como pode ser observado na Figura 9, com objetivo principal de minimizar os resíduos sólidos na rede de drenagem. “O mar começa aqui” faz parte das ações da campanha Mares Limpos da ONU, que vem sendo aderida por muitas instituições, como a Fundação Ambiental Área Costeira de Ipanema (FAACI), onde os bueiros vêm ganhando uma pintura especial para alertar sobre o descarte irregular de lixo em vias públicas.

Figura 9 – Campanha de Educação Ambiental



Fonte: FAACI (2019)

Além de informar e transmitir conhecimentos, a educação ambiental é capaz de promover a mobilização da sociedade para esta participação, devendo então estar presente nos meios técnicos (de planejamento, execução, operação e manutenção de sistemas), nos círculos de tomada de decisões e no meio político. A ausência de participação popular conduz à repetição de erros anteriores na solução dos problemas de drenagem, implica em descrédito nas ações públicas, assim como pode levar ao desprezo pela questão ambiental (POMPEO,2000).

A Educação Ambiental requer um trabalho interdisciplinar, onde o tema em foco possibilite a construção da cidadania voltada à compreensão da realidade social, direitos e responsabilidades de cada um no ambiente em que está inserido, transformando a sociedade em agentes capazes de mudança e conscientização, no meio social e comunidade pertencente.

➤ Ações de convívio com as águas de cheias

Medidas à prova de inundação estão associadas ao uso de técnicas permanentes, eventuais ou de emergência, para evitar que a água atinja as edificações e seus conteúdos, bem como infraestruturas diversas, ou para minimizar os danos causados pelas inundações (ANDJELKOVIC, 2001).

Existem inúmeras técnicas a fim de garantir uma construção à prova de inundação, como por exemplo a ancoragem da construção para resistir à flutuação, movimentos laterais e colapso; instalação de vedações para portas e janelas; reforço de paredes; instalação de válvulas de retenção para evitar a entrada de águas pluviais ou de esgoto através de aparelhos sanitários e ralos; localização de equipamentos elétricos, mecânicos e outros deterioráveis acima do nível de inundação esperado; instalação de pequenos diques, bermas ou outros tipos de barreiras, entre outras (FEMA, 1993 & BIGNAMI;SANFILIPPO, 2019).

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Dessa forma, quanto mais complexos os sistemas, mais desafiadores e necessários são os modelos. Um sistema como a bacia hidrográfica, é resultado de processos naturais, devendo o homem se adaptar aos seus condicionantes, entendendo o comportamento da bacia a partir de diferentes ações como precipitações extremas, modificações do uso do solo, estiagens, entre outras, para assim poder utilizar dos seus recursos (TUCCI, 2005).

Os modelos trazem em sua constituição uma concepção do sistema real. Mas, o sistema real, o ciclo da água e os escoamentos na bacia hidrográfica, são de natureza complexa, e por mais detalhadas que seja sua concepção, há simplificações intrínsecas na representação da dinâmica dos processos chuva-vazão e da hidrodinâmica envolvida nos escoamentos fluviais (BATISTA, 2014)

Segundo Cabral et al. (2009), os pacotes computacionais de drenagem urbana podem ser entendidos como a associação de modelos tipo chuva-vazão com modelos de propagação de escoamentos (em canais ou galerias), podendo ser utilizados para o planejamento e gerenciamento da drenagem urbana.

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio. A estrutura

atual desses modelos é baseada inicialmente na discretização da bacia hidrográfica em que os modelos utilizam critérios de subdivisão espacial para representar a bacia. As variáveis de entrada normalmente utilizadas são a precipitação e a evapotranspiração potencial. Em relação a estrutura básica da integração dos processos, ocorre uma separação em dois módulos: bacia, que simula o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia e o canal, simulando o escoamento em rios e canais definidos, propagando a vazão de montante e recebendo a contribuição das sub-bacias. Dados físicos das bacias também são importantes, em virtude da grande variabilidade das características naturais, uso do solo e alguns parâmetros, estimados com base nas características físicas e outros que devem ser ajustados com base em dados observados das variáveis de entrada e saída.

Em muitos países os modelos mais utilizados atualmente são: o SOBEK (Delft Hydraulics, Holanda), o InfoWorks (Wallingford Institute, Inglaterra), o MOUSE-DHI (Dinamarca) e o modelo SWMM (USEPA, Estados Unidos). Um dos primeiros modelos conceituais é o SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regularion, Estados Unidos), STANFORD IV, Modelos do MIT, HEC-1 Flood Hydrograph Package (US Army, Estados Unidos) (TUCCI, 2005).

No Brasil, muitos pesquisadores utilizam o modelo ABC (desenvolvido na Universidade de São Paulo – USP), o modelo IPH (desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH-UFRGS), o modelo MODCEL (desenvolvido na Universidade Federal do Rio de Janeiro) (CABRAL ET AL., 2009)

Nos últimos anos também tem sido utilizada a plataforma do PCSWMM, um programa que usa como base de cálculos o SWMM, entretanto com uma interface amigável associada a softwares de geoprocessamento com facilidade para explorar recursos como estruturas de drenagem sustentável, entre outros.

- **Storm Water Management Model – SWMM**

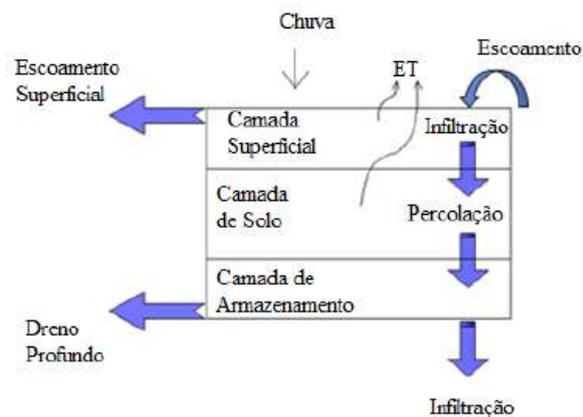
O programa SWMM – Storm Water Management Model – é um modelo hidrológico-hidráulico bastante difundido, desenvolvido pela U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), em constante utilização, usado principalmente para simulações em áreas urbanas a fim de auxiliar no planejamento, análise e concepção de projetos de escoamento de águas pluviais. Consiste em um modelo chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade

do escoamento superficial, tanto em eventos pontuais de chuva quanto em longo prazo, de forma contínua (Rossman, 2012).

O modelo analisado permite a introdução de controles de LID – Low Impact Development Practices que são representados pela combinação de camadas verticais, cujas propriedades são definidas por unidades de área. O SWMM pode modelar cinco diferentes tipos genéricos de LID: células de bioretenção, pavimento poroso, trincheira de infiltração, cisternas e valas vegetadas, que podem ser combinadas numa mesma sub-bacia (SOUZA, 2014).

Durante a simulação desses dispositivos, o SWMM realiza o balanço hídrico, determinando o que escoou de uma camada para a outra e o que é armazenado em uma camada. Como exemplo, as camadas utilizadas para modelar uma bacia de filtração e o caminho percorrido pela água entre essas camadas são representadas na Figura 10.

Figura 10 - Representação conceitual de um controle de LID – Bacia de Filtração



Fonte: Rossmand, (2012)

Para a realização da simulação hidrológica de uma bacia hidrográfica, o SWMM exige a entrada de informações básicas como: série de dados das precipitações; área e declividades da bacia; largura representativa da área da bacia; porcentagem de impermeabilização da bacia; coeficiente de rugosidade de Manning da bacia e dos canais; altura do armazenamento em depressões; parâmetros de infiltração.

No SWMM, estão incorporados os seguintes modelos de infiltração para calcular a chuva efetiva: Horton, Green Ampt e Curve Number (CN). Neste trabalho foi adotado o método do Curve Number como modelo de infiltração, devido a sua simplicidade e exigência de apenas um parâmetro (o Curve Number – CN) e à inexistência de dados medidos em campo que permitissem caracterização mais precisa dos parâmetros dos modelos Horton e Green-Ampt. Durante um

evento de chuva esta capacidade é deplecionada em função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração remanescente. Os parâmetros de entrada para este método são o número CN e o tempo que leva um solo saturado para secar completamente.

Em relação à modelagem computacional o SWMM é um modelo de simulação física que utiliza soluções discretas ao longo do tempo. Utiliza os princípios de conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento quando apropriado. O usuário pode selecionar o nível de sofisticação que deseja para resolver estas equações, visto a existência de três modelos hidráulicos: o fluxo em regime uniforme, a onda cinemática e a onda dinâmica.

O modelo de fluxo em regime uniforme representa a forma mais simples de transporte da água (na realidade não há propagação de vazões). Para isto, considera-se que em cada intervalo de tempo de cálculo o escoamento é uniforme e permanente. Desta forma, o modelo simplesmente transfere o hidrograma de entrada no nó de montante do conduto para o nó de jusante, sem atraso ou mudança na sua forma.

O modelo da onda cinemática resolve a equação da continuidade junto com uma forma simplificada da equação da quantidade de movimento em cada um dos condutos. Este modelo permite que a vazão e a área variem no espaço e no tempo no interior do conduto. Isto pode resultar em amortecimento e defasagem nos hidrogramas de saída com respeito aos hidrogramas de entrada nos condutos. No entanto, neste modelo de transporte não se podem simular efeitos como o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas, o efeito de remanso ou o fluxo pressurizado.

O modelo de transporte da Onda Dinâmica resolve as equações completas unidimensionais de Saint Venant e, portanto, teoricamente, gera resultados mais precisos. Esta equação resulta da aplicação da equação da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e da equação da continuidade dos volumes nos nós. pode levar em conta o armazenamento nos condutos, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas dos condutos, o remanso e o fluxo pressurizado.

Souza (2014) monitorou a quantidade e qualidade das águas de drenagem urbana das sub-bacias urbanas do Iate Clube e do Centro Olímpico em Brasília - DF , assim como a análise de cenários de implantação de bacia de detenção, utilizando o SWMM e PCSWMM. Os resultados apresentaram-se satisfatórios, verificando as melhores alternativas de reduções de pico e eficiência na remoção dos poluentes.

Rossi (2014) utilizou o modelo hidrológico PCSWMM, identificando vantagens por considerar as características geomorfológicas da bacia e distribuição espacial da chuva, sendo então mais adequado. Dessa maneira, verificou o desempenho do sistema, criando alternativas

para solucionar os problemas de drenagem, variando volume, localização de implantação de reservatórios, como também cenários hipotéticos, fundamentais para o planejamento urbano.

Silva Júnior (2015) propôs soluções para um ponto crítico de drenagem, localizado no cruzamento da Avenida João de Barros com a Rua Joaquim Felipe, no bairro da Soledade em Recife/PE com auxílio do modelo hidrológico SWMM.

Ferreira (2017) analisou quais os benefícios, em termos hidrológicos, da aplicação das técnicas de baixo impacto em uma área urbana, tendo como área piloto a bacia do riacho Moxotó, localizada na cidade do Recife/PE utilizando o modelo SWMM e seus recursos de aplicação LID.

Silva (2019) utilizou o modelo SWMM como auxílio para obtenção de vazões por trechos dos rios e riachos da bacia do rio Tejipió em Recife, para simulações hidrodinâmicas a fim de delimitar regiões inundáveis a partir de eventos de chuvas intensas com a influência dos movimentos das marés bem como simulações para cenários futuros.

3.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Em relação aos modelos de propagação do escoamento podem ser classificados em modelos de armazenamento ou hidrodinâmicos. Os modelos de armazenamento, como o próprio nome indica, consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e no deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação do momento. Os modelos que utilizam as equações de Saint-Venant são chamados de hidrodinâmicos e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com a consideração ou não dos termos da equação do momento. Se forem desprezados os termos de inércia e de pressão, tem-se o modelo da onda cinemática, no qual se tem a desvantagem da impossibilidade de simular fenômenos, tais como efeitos de jusante sobre o escoamento. Os modelos que resolvem as equações em sua forma completa são chamados de hidrodinâmicos completos, podendo representar com precisão os fenômenos mais importantes do escoamento em canais.

- **Hydrologic Engineering Center – River Analysis System – HEC-RAS**

A modelagem hidrodinâmica foi realizada através do HEC-RAS 5.0.6 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), software de domínio público desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos “US Army Corps of Engineers”,

que tem como finalidade realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para rede de rios e canais naturais e artificiais (USACE, 2016).

O termo HEC significa “Hydrologic Engineering Center” e o termo RAS significa “River Analysis System”. Atualmente o modelo realiza cálculos hidráulicos em 1D, 2D e acoplado 1D/2D, permitindo a simulação com regime de escoamento permanente, quase não - permanente e não-permanente, nos regimes crítico, subcrítico e misto, além da simulação do transporte de sedimentos e da qualidade da água. O modelo também permite analisar a qualidade da água, o transporte de sedimentos, e avaliar o efeito de estações de bombeamento e de estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, comportas, diques, pontes e bueiros (USACE, 2016a).

Na modelagem bidimensional em regime não permanente, o modelo utiliza as equações bidimensionais de Águas Rasas (também chamadas de equações bidimensionais de Saint-Venant) ou as equações da Onda Difusa. A discretização das equações da Onda Difusa é realizada utilizando o método das diferenças finitas para o tempo e um esquema híbrido combinando os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos para a discretização do espaço. Em relação às equações bidimensionais de Águas Rasas, utiliza-se o método dos volumes finitos na equação da continuidade e uma discretização que varia conforme o termo da equação da quantidade de movimento (USACE, 2016b).

As equações de Águas Rasas em duas dimensões são apresentadas a seguir, sendo a Equação 1 a da continuidade e as Equações 2 e 3 as da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (3)$$

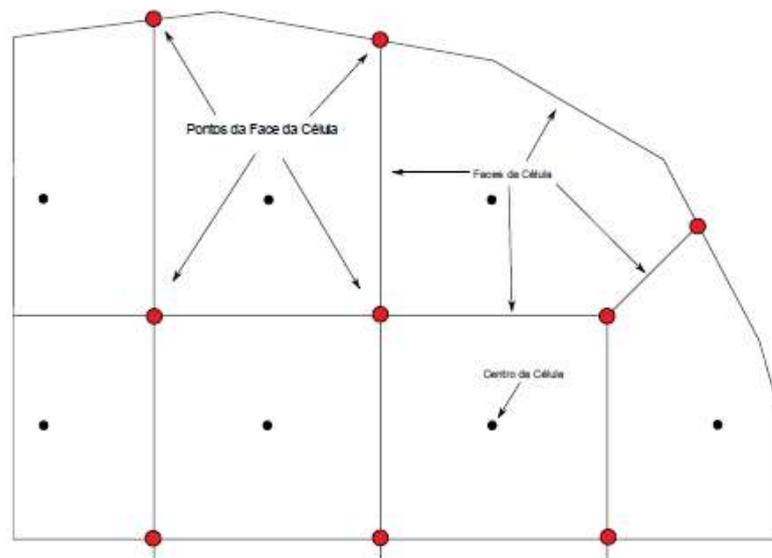
Onde: H - elevação da superfície da água que é igual à elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água (m); t - tempo; h - altura da lâmina de água (m); u e v - são as componentes da velocidade nas direções x e y , respectivamente; x e y - direções

cartesianas; q - fluxo de entrada/saída; g - aceleração da gravidade; ν_t - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal; c_f - coeficiente de atrito; e f - parâmetro de Coriolis.

Para a representação do escoamento na planície de inundação, esses modelos utilizam malhas computacionais com células regulares ou não regulares. Essa malha computacional possibilita simular a inundação se propagando no espaço bidimensional, ou seja, fluxos perpendiculares ao eixo do canal principal conforme a topografia representada através de um Modelo Digital de Elevação (MDE) (COUTINHO,2015).

Na malha computacional cada célula tem as seguintes propriedades: centro da célula, faces da célula e pontos das faces. Para cada célula, o cálculo da elevação da superfície da água é realizado no centro da célula. Este centro não corresponde necessariamente ao centroide da célula. As faces da célula geralmente são linhas retas que limitam o tamanho da célula. Cada célula é limitada a ter oito faces e elas controlam o movimento do fluxo entre as células. Já os pontos da face da célula, estão localizados nas extremidades das faces da célula e são utilizados para conectar elementos e condições de contorno (USACE, 2016c). A Figura 11 apresenta um esquema com as terminologias utilizadas para as células do modelo:

Figura 11 – Terminologia para modelagem computacional da malha no HEC-RAS 2D



Fonte: Usace (2016c)

Khalfallaha e Saidia (2018) utilizaram o HEC-RAS para previsão de enchentes no rio Mejerda, na Tunísia. Fijko et al. (2016) e Romali et al. (2018) utilizaram o HEC-RAS para modelar um canal aberto para avaliar os riscos de inundação. ShahiriParsa et al. (2016) estudaram o HEC-RAS para avaliar e prever a profundidade e a extensão espacial da

inundação na planície do rio Sungai Maka, na Malásia. Batista (2015) utilizou o HEC-RAS para simular eventos em regime permanente de picos de vazão para classificação de indicadores de risco no município de Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco, inserido na bacia do rio Pirapama. Os trabalhos científicos elencados atestam a eficiência e a multifuncionalidade da combinação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.

3.6 DADOS ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

Os dados fornecidos por Sensoriamento Remoto (SR), como as imagens de satélites, têm ganhado notoriedade nos últimos anos, devido à capacidade deles em fornecer detalhes e informações sobre a superfície terrestre (AZEVEDO, 2018).

O desenvolvimento das tecnologias da informação disponibilizou recursos que aprimoraram os processos de planejamento e gestão urbana, desenvolvendo novos usos da informação. As técnicas convencionais de planejamento urbano, quando aplicadas no monitoramento da expansão das cidades, não têm conseguido acompanhar a velocidade com que o fenômeno se efetua. O suporte do geoprocessamento é essencial para a quantificação de muitas variáveis e parâmetros necessários à aplicação dos modelos de simulação: delineamento de bacias hidrográficas e correspondentes redes de drenagem, áreas de seções de escoamento no leito maior dos rios, traçado, comprimento e perfis dos canais, fator de forma, tipologia e quantificação dos diferentes tipos de solo e do parcelamento do seu uso e ocupação, entre outras, contribuindo para maior eficiência da ação dos órgãos de planejamento (FARINA, 2007 & GÓES, 2011).

Para as regiões imageadas, com exceção dos Estados Unidos, a base de dados disponibilizada publicamente é a SRTM-90, com pontos cotados espaçados aproximadamente 90m entre si. Sobre ela o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizou trabalho de preenchimento de falhas e interpolação, o que deu origem ao TOPODATA – base de dados espaciais de todo o território nacional equivalente, segundo os autores, à base de dados SRTM com pontos cotados a cada 30m (VALERIANO, 2008).

A precisão altimétrica da base global SRTM, porém, não atende aos requisitos de precisão demandadas para muitos estudos e projetos. Assim, com o objetivo de complementar e integrar um novo recurso de aquisição de dados surgiu uma técnica propondo aerolevantamentos para obter uma varredura a laser do terreno (CIRILO, 2014).

Os sistemas de perfilamento baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ou sistemas de varredura LASER têm sido considerados uma revolução no que diz

respeito à obtenção de MDS. Os dados topográficos obtidos são tidos como os mais confiáveis para modelagem hidrodinâmica, devido à sua alta resolução horizontal e precisão vertical

O princípio de funcionamento do LiDAR é baseado na utilização de um pulso de laser, disparado na direção da superfície com uma elevada frequência de repetição. Baseado no tempo de retorno, na posição do sensor e na orientação do raio é calculada a posição tridimensional do objeto. Sensores LiDAR de alta frequência conseguem gerar uma densa nuvem de pontos, em três dimensões, descrevendo com elevado grau de detalhes a estrutura do objeto imageado (GIONGO et al., 2010 & LOCKS, 2019).

Com uso dessa tecnologia, foi desenvolvido o programa Pernambuco Tridimensional (PE 3D), gerando ortofotos na escala 1:5000, com erro aceitável de altimetria inferior a 10cm, Mais informações técnicas dos produtos do PE 3D estão apresentados na Tabela 1 a seguir (CIRILO, 2015).

Tabela 1 – Características técnicas dos produtos do Pernambuco Tridimensional

	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.

As ferramentas desenvolvidas possibilitam diversos estudos para modelagens hidrológica e hidrodinâmica, assim como sistemas de alertas para controle de enchentes, previsão de eventos de inundação.

Alves (2017) desenvolveu um modelo de previsão de enchentes, capaz de integrar informações de previsão de chuva, modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica utilizando os dados de altimetria do PE 3D. Simulou para as cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros, na bacia do rio Una, o maior evento de chuva já registrado, ocorrido em 2010, visualizando as áreas urbanas inundadas a partir de manchas de inundação.

Ferraz (2019) teve como objeto de estudo a bacia do rio Sirinhaém, com uso do PE 3D, na simulação hidrodinâmica, obtendo as manchas de inundação para as áreas urbanas dos municípios de Barra de Guabiraba, Cortês, Gameleira, Sirinhaém. A simulação correspondeu ao evento de precipitação intensa ocorrido em 2010, comparando a redução das áreas inundáveis com a presença das barragens de contenção de cheia construídas.

Melo Silva (2019) utilizou o PE3D para realizar a modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional da bacia do rio Ipojuca, para quantificar a magnitude de vazões que provocam inundação na zona urbana de Caruaru, identificando uma boa representação do modelo, especialmente devido a resolução do MDT.

Oliveira Silva (2019) realizou simulações hidrodinâmicas na bacia do rio Tejipió, em Recife, delimitando regiões inundáveis a partir de eventos de chuvas intensas com a influência dos movimentos das marés bem como simulações para cenários futuros, utilizando os dados do PE 3D. A modelagem da bacia possibilitará tomada de decisões sobre projetos e obras na bacia, objetivando apresentar soluções, inclusive as decorrentes do aumento do nível médio do mar, como prevê estudos do IPCC, e auxiliar também no planejamento urbano.

Silva (2019) analisou a aplicação de telhados verdes e pavimentos permeáveis como alternativas para alagamentos urbanos, avaliando a eficiência do ponto de vista técnico e econômico, com uso do PE 3D na bacia do canal da malária, afluente do rio Tejipió, em Recife. As simulações ao longo dos cenários propostos nesta pesquisa retornaram resultados satisfatórios.

Outro dado espacial de alta resolução utilizado foi o MapBiomass, um projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil, que surgiu em um seminário realizado em março de 2015 em São Paulo, com a presença de especialistas em sensoriamento remoto e mapeamento de vegetação.

A plataforma MapBiomass disponibiliza os mapas anuais de cobertura e uso da terra de 1985 a 2018, permitindo a visualização e consulta por categorias como: para o Brasil, biomas, estados, municípios, regiões e bacias hidrográficas, unidades de conservação e terras indígenas. Todas as informações são disponibilizadas através de mapas e estatísticas que podem ser baixadas em Geotiff e Excel, respectivamente. Além disso, também disponibiliza informações das transições de cobertura e uso da terra e estatísticas associadas (ROSA,2019).

Trata de uma rede colaborativa nas áreas de sensoriamento remoto, biomas, uso da terra, SIG e ciência da computação, conforme indicado por Almeida et al. (2018). O mapeamento produzido pelo Mapbiomas é baseado nas imagens do satélite Landsat, mas o processo de classificação é 100% automatizado, utilizando processamento das imagens na

infraestrutura de computação em nuvem com uso da plataforma Google Earth Engine (GEE) e armazenamento usando o Google Cloud (MAURANO,2019).

O propósito de tal projeto tem como base os seguintes fatores:

- Desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil a partir de 1985 até os dias atuais (e posterior atualização anual).
- Criação de uma plataforma para facilitar a disseminação da metodologia para outros países e regiões interessadas utilizando a mesma base de algoritmos.
- Estabelecer uma rede colaborativa de especialistas nos biomas brasileiros para o mapeamento da cobertura do solo e da sua dinâmica de mudanças.

Almeida et al. (2018) analisaram a variabilidade espacial nos municípios de Caruaru e Toritama, em Pernambuco utilizando a plataforma MapBiomass, atestando a eficácia da técnica de Sensoriamento Remoto.

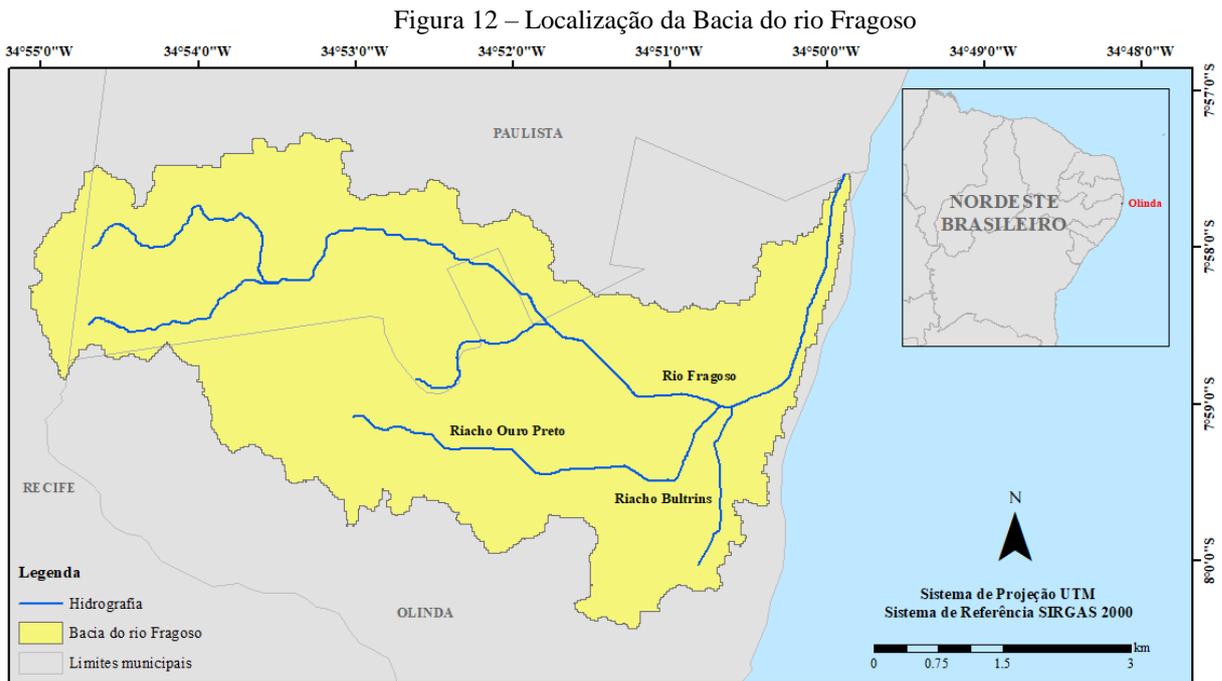
Fortunato et al. (2019) realizaram uma avaliação espaço-temporal entre os anos de 2000 e 2017, verificando as principais modificações ocorridas na formação florestal do município de Salvador, Bahia. Verificou-se a eficácia da análise, permitindo avaliação estatística e distribuição espacial das diversas alterações (ganhos e perdas).

Santos et al. (2019) analisaram metricamente a paisagem na série temporal, identificando os anos de supressão da vegetação ou alternância de práticas agrícolas. Com as informações adquiridas a partir da análise dos dados, verificou-se a possibilidade de acompanhar as áreas com relevante interesse ecológico, assim como identificar nichos ecológico que abrigam espécies animais e vegetais.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica do rio Fragoso encontra-se inserida na Mesorregião Metropolitana do Recife, na Unidade de Planejamento Hídrico UP-14, GL1 do grupo dos pequenos rios litorâneos, no litoral norte do Estado de Pernambuco. Situa-se, em maior parte, no município de Olinda, com ocupação de 62% e uma outra parte menor, nos municípios de Paulista e Recife, com ocupação de 35% e 3%, respectivamente. O rio Fragoso tem comprimento de cerca de 14,7 km, desde a nascente até a sua desembocadura em um estuário em conjunto com o rio Paratibe. A bacia do rio Fragoso possui área de contribuição de 28,6 km² e população estimada de 268 mil habitantes. Os principais afluentes são: riacho Ouro Preto e riacho Bultrins, como pode ser observado na Figura 12.



Fonte: A Autora (2021).

*Dados obtidos de dados do IBGE.

A bacia do rio Frágoso ocupa 13 bairros. Ao norte encontram-se os bairros do Rio Doce, Jardim Atlântico, Frágoso de Olinda e Frágoso de Paulista, Tabajara de Olinda e Tabajara de Paulista, Torres de Galvão do Paulista e Mirueira do Paulista; a oeste, o bairro do Córrego do Caboclo; ao sul, os bairros do Jatobá, Ouro Preto, Bultrins e Alto da Nação; e ao Leste, os bairros do Bairro Novo e Casa Caiada (MELO, 2007).

A bacia do rio Frágoso limita-se ao norte com a bacia do Rio Paratibe, ao sul com a bacia do rio Beberibe, a Oeste com as bacias dos rios Paratibe e Beberibe e ao leste com o Oceano Atlântico (MELO, 2007).

O rio Frágoso deságua no rio Paratibe, a poucos metros da sua foz, sugerindo por Novaes (1990) apud Melo (2007) que a interligação entre as bacias ocorreu por força de ação antrópica forçando o posicionamento do rio Frágoso como um afluente do rio Paratibe, possivelmente durante a construção da ponte do Janga que liga o município de Olinda ao município de Paulista.

- **Análise da rede de drenagem existente**

Foi realizada uma visita de campo e análise de notícias, reportagens e documentos com objetivo de reconhecer a área em estudo e identificar possíveis causas que contribuem para os alagamentos que ocorrem atualmente. Também foi possível conversar com moradores e comerciantes locais, que informaram os transtornos, perdas materiais que vivenciaram com as ocorrências das inundações, em especial os últimos eventos de cheia ocorridos nos dias 10 e 30 de maio de 2016 e 24 de julho de 2019.

Em relação a microdrenagem, em algumas ruas de Olinda é possível encontrar o sistema de drenagem do tipo canaleta retangular, devido a topografia plana do local. Esta medida torna-se necessária para evitar grandes desníveis e a necessidade de recobrimento, quando aplicado na drenagem tradicional com tubulação de concreto. Tais canaletas possuem em geral, dimensões de 0,40 metros de largura com aproximadamente 0,40 metros de profundidade e declividade de 0,004 m/m. A tampa da canaleta é de concreto armado, com as dimensões de 1,10 metros de comprimento; 0,80 metros de largura e uma espessura de 0,12 metros. A tampa possui furos para captação da água pluvial com diâmetro de 5 centímetros, espaçados 15 centímetros eixo a eixo na direção transversal à rua e 10 centímetros na direção longitudinal da rua, podendo ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Drenagem do tipo canaleta na rua Gentil Ferreira Gusmão, Olinda - PE



Fonte: Google Earth (2021).

Foram encontradas bocas de lobo degradadas, com tampas esmagadas, cuja destruição pode ter ocorrido por excesso de carga no tráfego de veículos, ou espessura de laje insuficiente para resistir aos esforços demandados, o que contribui para a redução da capacidade de funcionamento da microdrenagem, como pode ser observado na Figura 14.

Existem várias situações de estrangulamento de abertura da boca coletora, podendo ter ocorrido por intervenção física irregular. A falta de manutenção e de limpeza da microdrenagem contribui para o assoreamento do curso d'água afluyente das galerias de despejo das águas pluviais como pode ser observado com a presença de vegetação rasteira na Figura 15.

A obstrução ocasionada por lixo também é um problema fortemente observado, que pode vir a ocasionar entupimento das galerias e obstruções das bocas coletoras, decorrente da falta de conscientização popular em dar o destino correto do lixo. A ausência de saneamento básico adequado também prejudica o sistema de drenagem, sendo possível verificar o despejo de esgotos de muitas residências incorretamente no rio e também a presença de esgoto a céu aberto, percorrendo pelas sarjetas (Figura 16 e 17).

Figura 14 – Boca de lobo obstruída



Fonte: A Autora (2021).

Figura 15 – Presença de vegetação rasteira



Fonte: A Autora (2021).

Figura 16 – Resíduos na boca de lobo



Fonte: A Autora (2021).

Figura 17 – Destinação incorreta de esgoto doméstico



Fonte: A Autora (2021).

Para complementar a caracterização da área, foram utilizados dados dos setores censitários urbanos, que são as unidades territoriais utilizadas pelo IBGE para estabelecimento do Censo Demográfico. No último Censo, em 2010, de acordo com os dados obtidos do IBGE, identificou-se a bacia do rio Fragoso e então as condições referentes ao saneamento, encontradas na tabela “Domicilio_01”. Diante disso, foi possível identificar o seguinte: aproximadamente 37,92% dos domicílios têm esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial, 37,28% via fossa rudimentar, 16,36% via fossa séptica, 4,69% via rio, lago ou mar, 2,92% via vala e 0,84% via outro escoadouro.

Em relação ao lixo coletado, 90,48% dos domicílios têm destino por meio do serviço de limpeza, 4,60% dispõe em caçamba de serviço de limpeza, 3,11% joga em terreno baldio,

1,44% queimam o lixo na propriedade, 0,11% jogam em rio, mar ou lago, 0,18% dão outro destino e 0,08% enterram na propriedade.

Em relação a macrodrenagem da Bacia do rio Frágoso, o curso principal no trecho da planície está sendo canalizado, passando a se chamar Canal do Frágoso e em sua margem direita, encontram-se o riacho Ouro Preto e o Riacho dos Bultrins e na sua margem esquerda, o riacho da Mirueira. O projeto do canal do Frágoso, conta com alargamento e aprofundamento da calha fluvial em uma extensão de aproximadamente 6,10 km, apresentado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Pernambuco - DER-PE.

O canal do riacho Ouro Preto percorre, aproximadamente 3,5 quilômetros ao longo de áreas urbanas consolidadas ou em processos de urbanização. O trecho do canal apresenta uma configuração retilínea, com perfil longitudinal com pontos de maior profundidade e pontos rasos, evidenciando pontos de acúmulo sedimentar ou mesmo com estruturas antrópicas que promovem modificações do fluxo corrente de águas e sedimentos ao longo do trecho avaliado, contribuindo para potencializar os eventos de enchentes e inundações (COSTA et al., 2016).

Segundo Costa et al. (2016), as ações de revestimento, retificação e ocupação das margens foram observados no canal do Ouro Preto e entre outros aspectos que potencializam tais processos, como a presença de densa vegetação em trechos das margens revestidas e mesmo em espaços do revestimento que sofreram colapso, que refletem a não limpeza periódica por parte do poder público municipal de tal ambiente. Também se observou em algumas partes do canal uma grande quantidade de resíduos sólidos no interior do canal ou em suas margens, além do lançamento de águas servidas provenientes de áreas residenciais, o que aumenta o potencial de extravasamento das águas fluviais.

O canal do riacho Bultrins apresenta uma extensão de aproximadamente 3,6 quilômetros também ao longo de áreas urbanizadas desde o seu início até a foz. Uma das seções levantadas pela equipe de topografia da Geosistemas é no trecho do canal entre a Avenida Chico Science e a Rua Dr. Milton Pina com largura de aproximadamente 6 metros, e altura variando entre 1,5 e 3 metros (MELO, 2007). Melo (2003) diagnosticou que as últimas obras executadas no Canal dos Bultrins não foram suficientes para atender a demanda do fluxo de vazão de pico e que o lixo é uma constante no âmbito de ações negativas praticadas pelos moradores.

4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSIOGRÁFICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO

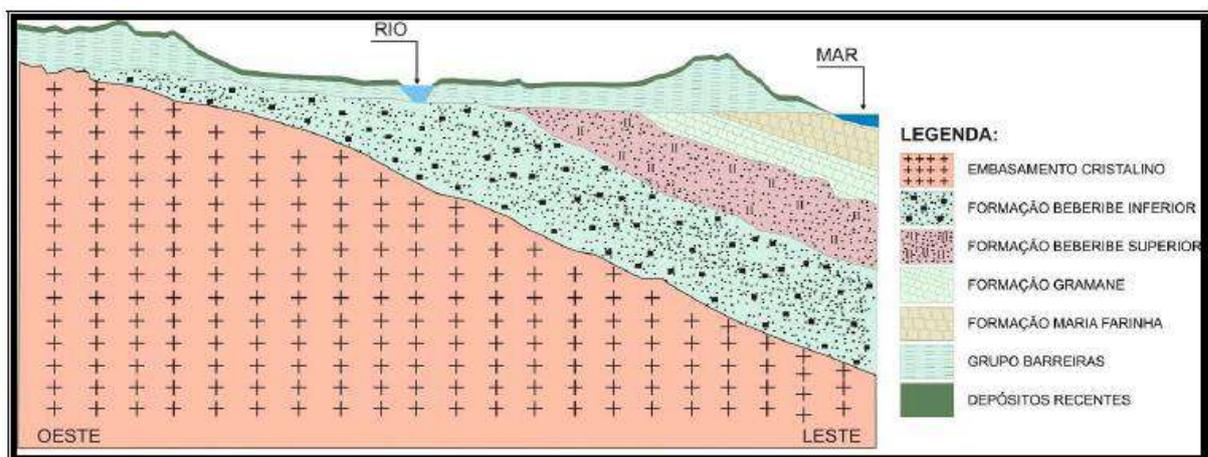
4.2.1 Geologia

A cidade de Olinda é geologicamente constituída por sedimentos de natureza bastante diversificada, não apenas do ponto de vista litológico, mas ainda em função do ambiente de sedimentação e da época em que foram depositados (GUSMÃO FILHO, 2001).

A bacia do rio Fragoso está geologicamente localizada na Faixa Sedimentar Cretácea Paleocênica. Segundo estudos geofísicos, a Faixa Sedimentar Norte de Pernambuco é afetada por falhas paralelas e normais à costa, conferindo uma compartimentação irregular de blocos nivelados. Trata-se de uma sucessão de blocos, cujas camadas estão dotadas de horizontalidade, que mergulham, de maneira suave, na direção do oceano, com inclinação entre 5 e 25 m/km (BELTRÃO et al., 1995).

Para uma melhor visualização das seções geológicas existentes no trecho da bacia, é possível observar a Figura 18 a seguir:

Figura 18 - Unidades Litoestratigráficas da Faixa Sedimentar Norte (PE) Seção Esquemática Leste Oeste Bacia do Rio Fragoso



Fonte: Adaptado de BELTRÃO et al. (1995).

Segundo o shape Hidrogeologia do Nordeste disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) a bacia do Rio Fragoso tem as unidades geológicas do grupo Barreiras (predominando argilito arenoso e arenito conglomerático) e Depósitos Flúvio-marinhos (predominando areia, argila e silte) (Figura 19).

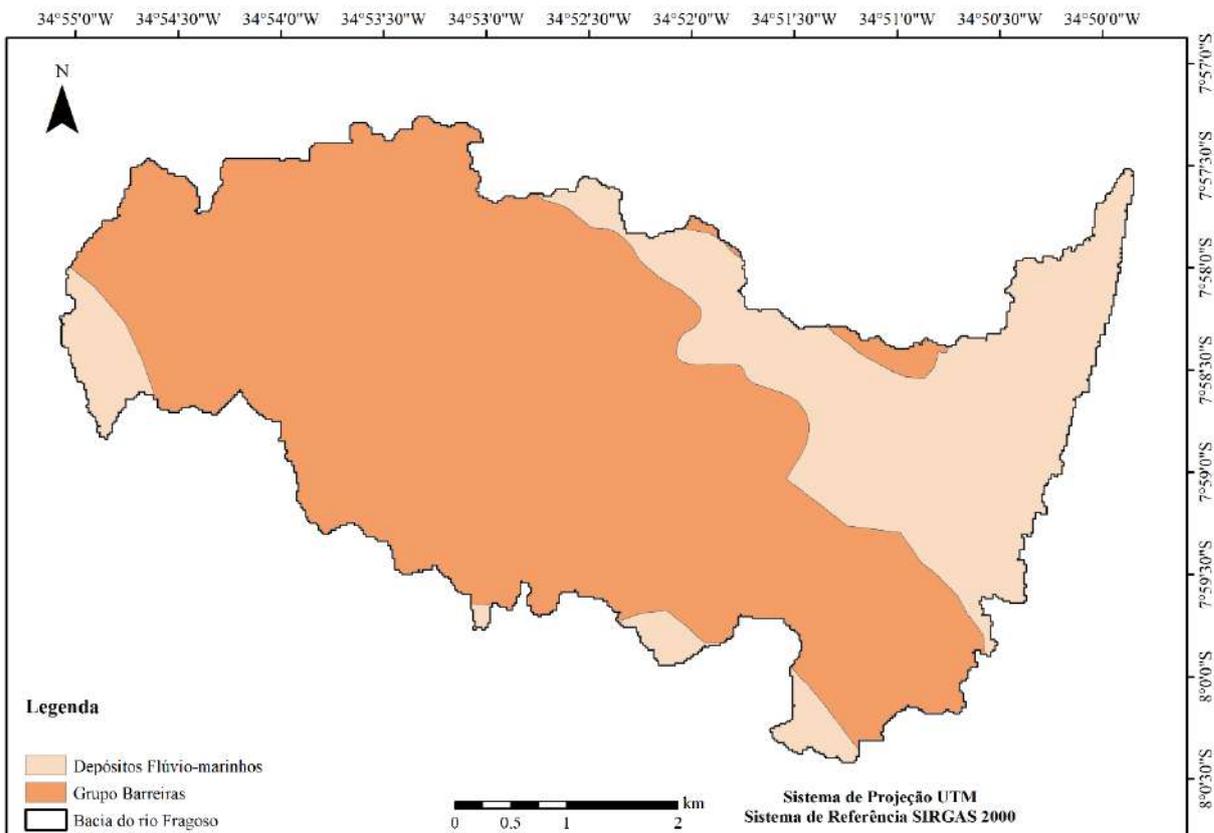
A Formação Barreiras, também de origem fluvial, foi depositada sobre parte do embasamento cristalino e das bacias sedimentares. As camadas que a constituem são mais

arenosas e argilosas, típicas de depósitos por enxurradas (leques aluviais). As areias dessa formação mostram um alto conteúdo de feldspatos, os quais, sujeitos aos processos de argilização sob o clima quente e úmido, favorecem episódios de deslizamentos. É na Formação Barreiras em que se observa a maior incidência de casos de deslizamentos e erosões (DER-PE, 2014).

Segundo Beltrão (1995) a predominância da fração de argila na composição destes sedimentos, no caso de barreiras, potencia problemas geotécnicos, principalmente em épocas de chuva, em função da sua grande capacidade de absorção de água e de redução da capacidade de suportar carga superficial e da tensão de cisalhamento.

Para as planícies de aluviais, encontra-se o nível da água a poucos metros da superfície, com solos moles, caracterizando-se por oferecer pouca estabilidade para as obras de engenharia e problemas constantes de inundações (MELO, 2003).

Figura 19 – Unidades geológicas para a bacia do rio Fragoso.



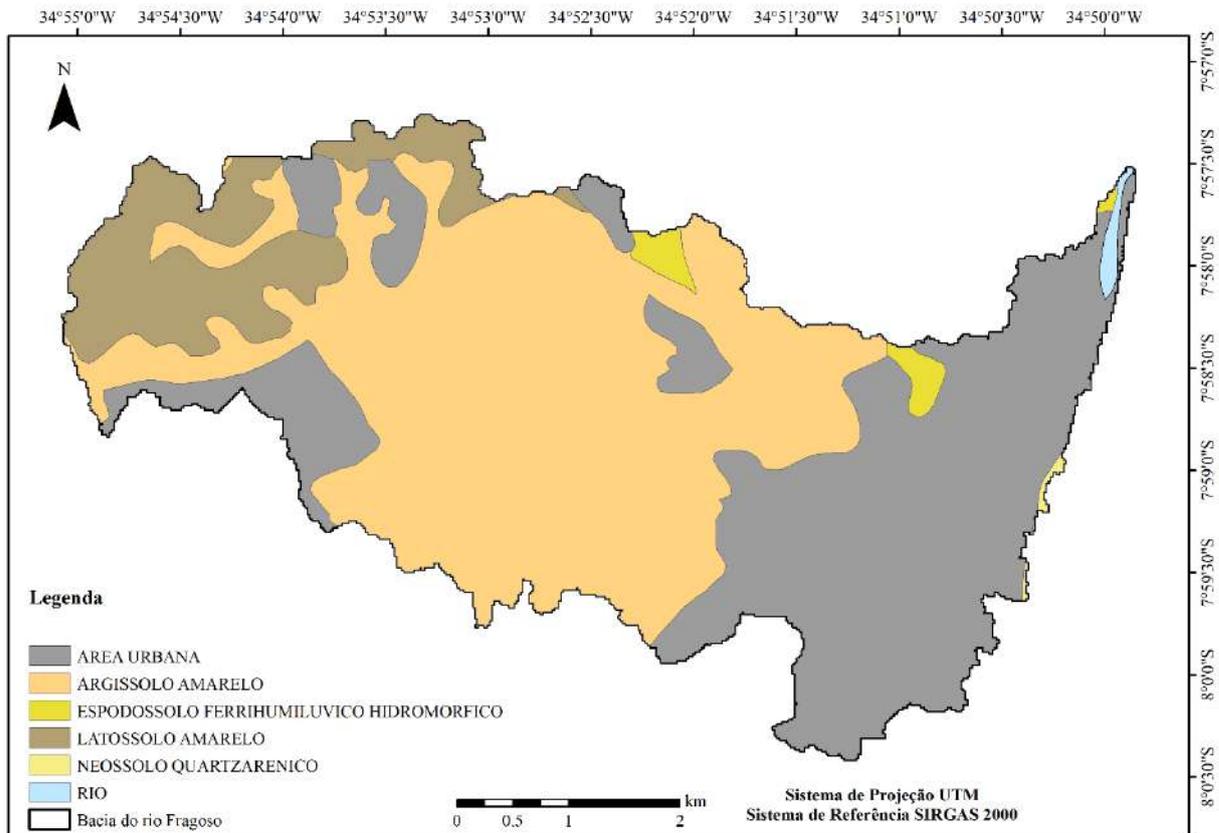
Fonte: A Autora (2021).

*baseada em informações do IBGE.

4.2.2 Pedologia

De acordo com a classificação de solos da Embrapa, a bacia do Rio Fragoso foi classificada em argissolos amarelo, espodossolo ferrihumiluvico, latossolo amarelo, neossolo quartzarênico, rio e área urbana (Figura 20).

Figura 20 – Classificação do solo para a bacia do rio Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

*baseada em informações da Embrapa.

4.2.3 Climatologia

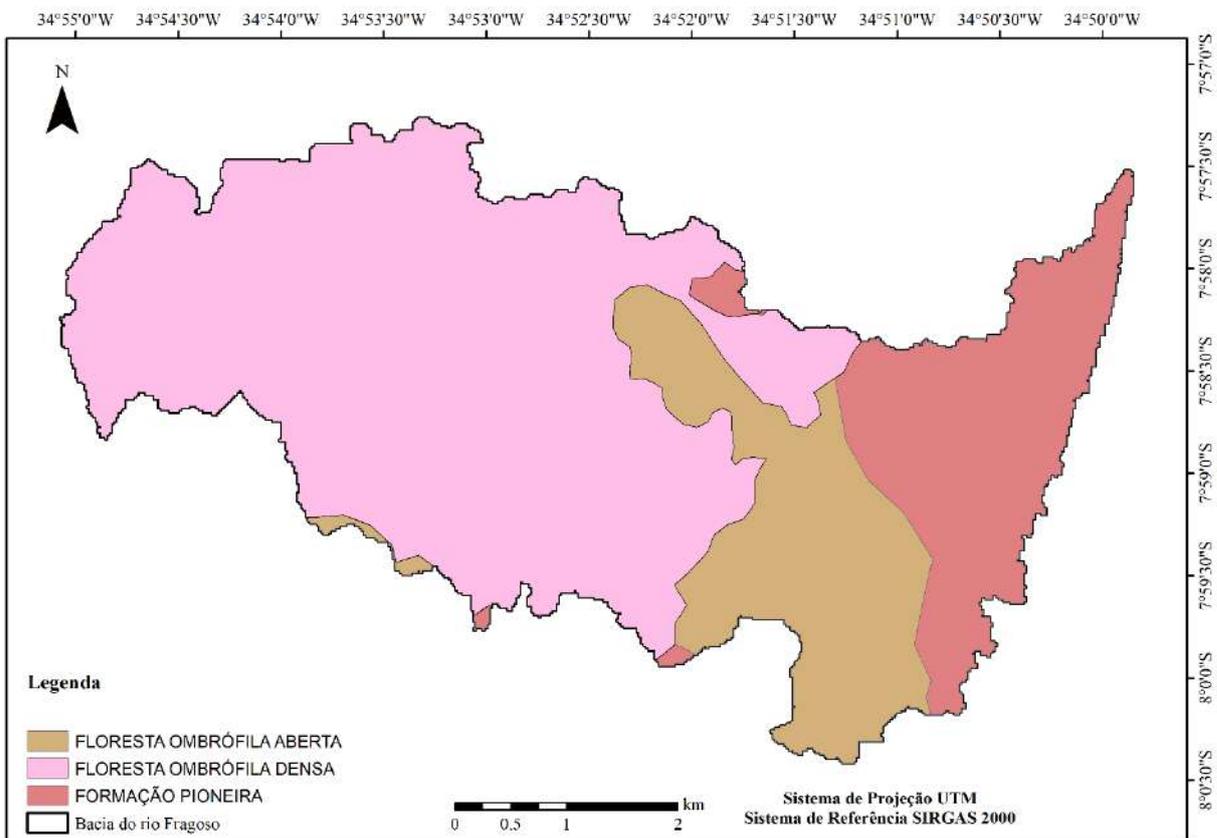
Segundo a classificação climática de Köppen do Brasil, de acordo com a EMBRAPA, o clima dominante na área é o As – Clima tropical quente e úmido, com chuvas de outono e inverno. Esse tipo de clima predomina no litoral oriental do Nordeste, desde o leste da Micro Região de Paulo Afonso, na Bahia faixa costeira de Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba e partes do Rio Grande do Norte. O índice pluviométrico é superior a 1700 milímetros (mm) anuais, com precipitações abundantes na maior parte do ano, especialmente entre os meses de março e agosto (MELO, 2007).

4.2.4 Cobertura Vegetal

Segundo o mapa temático de vegetação do Brasil disponível pelo IBGE, a bacia do rio Fragoso era originalmente constituída por Floresta Ombrófila aberta, densa e formação pioneira, associados aos manguezais e restingas (Figura 21).

Através do mapa de cobertura vegetal da FIDEM (1995) (Figura 22), era possível observar mata, vegetação arbustiva, cultura, áreas sem vegetação e áreas urbanizadas. Esse mapa foi elaborado utilizando-se fotografias aéreas na escala 1:30.000 de 1984/88, complementado com imagens de satélite LANDSAT-TM de 1991 e vistoria de campo.

Figura 21 – Cobertura vegetal originalmente da bacia do rio Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

* baseada em informações da FIDEM.

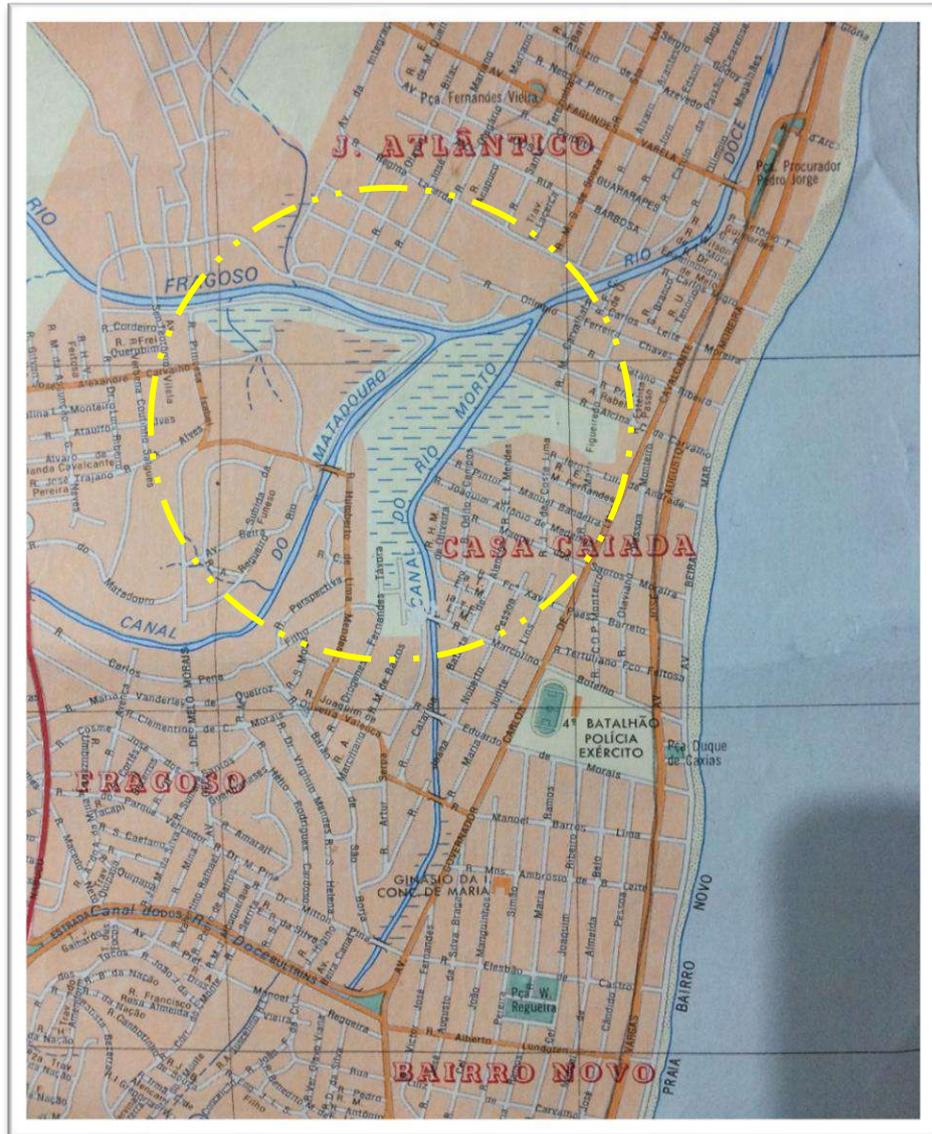
Figura 22 – Mapa da cobertura vegetal com destaque para bacia do rio Fragoso



Fonte: FIDEM (1995).

Na classificação do MapBiomas foram observados ecossistemas associados aos manguezais e restingas, não mais identificados atualmente, devido ao processo de urbanização da bacia. Com base na Carta da Nucleação Centro (1987) – Projeto Grande Recife, desenvolvido pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM), do Governo do Estado de Pernambuco, também é possível perceber a presença de áreas de Manguezais na bacia do Rio Fragoso (Figura 23).

Figura 23 – Presença de manguezais na bacia do rio Fragoso



Fonte: FIDEM (1987).

Com base no relatório do Projeto Executivo de Engenharia para adequação da II Perimetral Metropolitana e implantação e pavimentação da Via Metropolitana Norte (CONTÉCNICA, 2014), obra que está dentro da bacia do rio Fragoso foi realizado um levantamento das espécies existentes ao longo da área de influência da rodovia. A II Perimetral e a Via Metropolitana iniciam-se no entroncamento com a PE-015 (Terminal de Passageiros-SEI), e tem o seu final no entroncamento com a PE-001, na Ponte do Rio Paratibe, com extensão aproximada de 6,1 km. Como as vias margearão o rio Fragoso, a primeira etapa da obra consiste no alargamento e canalização do curso d'água, em trecho de 2,3 km.

Ainda com base no relatório, durante a visita realizada por técnicos desta consultora, verificou-se que os donos das propriedades e construções ao longo do trecho observado, mantêm árvores essencialmente de espécies frutíferas como bananeira, mangueira, jambo, coqueiros, entre outras. Também conseguiram observar últimos exemplares da cobertura vegetal de Mata Atlântica, que se encontram nas reservas da Mata do Ronca e a Mata do Quartel do 7º GAC/EX, localizadas nas nascentes da bacia do Rio Frágoso.

5 METODOLOGIA

Esse estudo foi desenvolvido em cinco etapas principais. A primeira etapa foi a determinação das características geomorfométricas da Bacia do Rio Fragoso. A segunda etapa consiste na análise do avanço da urbanização da bacia em estudo. A terceira etapa engloba a obtenção dos parâmetros e variáveis para dados de entrada do modelo PCSWMM e calibração. A quarta etapa realiza a simulação e análise do cenário atual e após o término da obra do Canal do Fragoso. E a última etapa, simula e analisa o cenário de aplicação da técnica LID.

5.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOMÉTRICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO

Por intermédio do software QGis versão 2.14.18 e da série de procedimentos computacionais realizados que condicionam gradativamente um MDT à sua hidrografia, permitindo a simulação real do escoamento da água superficial, foi possível mensurar a área e perímetro da bacia de estudo, além dos parâmetros físicos básicos e essenciais à determinação de suas características morfométricas.

No presente trabalho foram avaliados os seguintes parâmetros: área de drenagem (A) e perímetro da bacia (P), coeficiente de compacidade (Kc), fator de forma (F), índice de circularidade (IC), densidade de drenagem (Dd), coeficiente de manutenção (Cm), comprimento do canal principal, comprimento total de todos os canais, sinuosidade (Sin) e declividade média da bacia.

O fator de forma (Equação 4) é a relação entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial, medindo ao longo do curso d'água principal, desde seu exutório até o ponto mais distante sobre a linha de divisores d'água. O coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius (Kc) (Equação 5) é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual à da bacia. Simultaneamente ao coeficiente de compacidade, o índice de circularidade (Equação 6) tende para unidade à medida que a bacia se aproxima a forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada, segundo a equação (CARDOSO, 2006).

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (4)$$

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

$$IC = \frac{12.57 * A}{P^2} \quad (6)$$

Em que: F= Fator de forma, adimensional; A=Área de drenagem, m²; L=comprimento axial, m; Kc = Coeficiente de compacidade, adimensional; P=Perímetro da bacia, m; IC = Índice de Circularidade.

A densidade de drenagem da bacia indica a eficiência da drenagem da bacia. É definida pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem (Equação 7). Outro parâmetro morfométrico significativo refere-se ao coeficiente de manutenção (Equação 8), obtido em m²/m (SANTOS, 2012). Sinuosidade do curso d'água (Equação 9) é a relação entre o comprimento do curso d'água principal e o comprimento do seu talvegue, medido em linha reta.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (7)$$

$$C_m = \frac{1}{D_d} * 1000 \quad (8)$$

$$Sin = \frac{L_{rp}}{L_d} \quad (9)$$

Em que: D_d = Densidade de drenagem, km/km²; L_t – Comprimento total de todos os canais, km; A = Área de drenagem, km²; C_m – Coeficiente de manutenção, m² m⁻¹; D_d – Densidade de drenagem, km/km²; Sin = Índice de sinuosidade, L_{rp} - comprimento do rio principal, L_d - comprimento do talvegue medido em linha reta.

A partir do MDT da bacia foi calculado a elevação média. Para obter a declividade média, em graus, na bacia, foi utilizado foi utilizado a ferramenta de geração de declividade através das opções: Raster > Análise do Terreno > Declividade. A ferramenta de declividade calcula o ângulo de inclinação para cada célula em graus (com base na estimativa derivada de primeira ordem).

Também foi obtido a declividade em percentual através do Plug-in GDAL/OGR, através das opções Raster > Análise > Declividade. Para classificação das declividades na bacia foram utilizados seis intervalos distintos de classes, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2009), conforme a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Classificação da declividade

Declividade (%)	Discriminação
0 – 3	Relevo Plano
3 – 8	Relevo Suave Ondulado
8 – 20	Relevo Ondulado
20 – 45	Relevo Forte Ondulado
45 – 75	Relevo Montanhoso
> 75	Relevo Escarpado

Fonte: Adaptado Embrapa (2009).

5.2 AVANÇO DA URBANIZAÇÃO COM USO DO MAPBIOMAS

Com base nas informações da plataforma MapBiomias, todos os mapas anuais de cobertura e uso do solo do MapBiomias são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, com resolução de 30 metros. Para cada ano foram utilizadas imagens do melhor Landsat disponível, sendo assim: 1985 a 1999 – Landsat 5 / 2000 a 2002 – Landsat 7/ 2003 a 2011 – Landsat 5 / 2012 – Landsat 7 / 2013 a 2017 – Landsat 8.

Todo processo é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (machine learning) através da plataforma Google Earth Engine, com uma série temporal de mais de 30 anos, que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem. Para facilitar a parametrização dos algoritmos e a organização de todas as etapas de processamento utilizam-se as 556 cartas de 1 x 1,5o (lat/long) do IBGE, sendo exemplificado na Figura 24.

Figura 24 – Simplificação da metodologia do MapBiomias



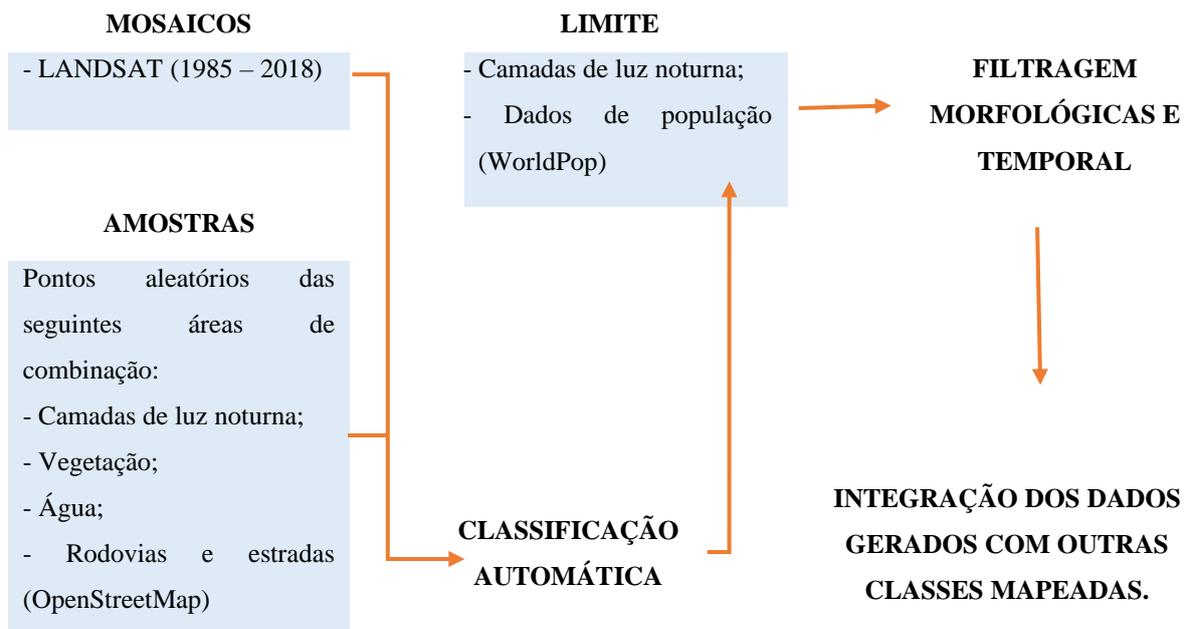
Fonte: MapBiomias (2021).

Em relação à classificação da infraestrutura urbana na Coleção 4, utilizou-se o mosaico das imagens Landsat do período de 1985 até 2018, e, portanto, considerando uma série histórica de 33 anos, foi aplicada uma classificação automática utilizando o treinamento de amostras. Primeiramente, foi realizado um filtro utilizando uma camada de dados de

rodovias, estradas e ruas obtidas através do OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2018), posteriormente, foi produzida uma classificação primária das áreas urbanas usando uma camada de vegetação, uma camada de água e luz noturna, com o objetivo de remover as áreas do mapa que não pertenciam a infraestrutura urbana.

Para limitação da classe da infraestrutura urbana também foi utilizado dados de densidade populacional do WorldPop (WorldPop, 2018) e a camada de luz noturna. Após à classificação finalizada foi aplicado um filtro temporal e morfológico considerando frequência do dado e o preenchimento de dados com falha, por fim foi realizada uma interação do resultado gerado pela classe de Infraestrutura urbana e as demais classes avaliadas pelo MapBiomias, exemplificado na Figura 25.

Figura 25 – Etapas metodológicas para classificação das áreas de infraestrutura urbana no MapBiomias.



Fonte: Adaptado do apêndice Infraestrutura Urbana – MapBiomias.

Para cada ano é montado um mosaico que cobre o Brasil, que será utilizado como fonte de parâmetros para o algoritmo classificar as imagens, onde também é obtido a composição RGB que permite visualizar a imagem de fundo na plataforma MapBiomias. O RGB (*Red, Green and Blue* em inglês, ou seja, vermelho, verde e azul) é um sistema que regula as cores dos corpos que emitem luz, sendo muito utilizado para visualização de imagens de sensoriamento remoto. Esta composição também é utilizada para a coleta de amostras de treinamento e avaliação da acurácia por interpretação visual.

A partir dos mosaicos de imagens, as equipes de cada bioma e de cada tema produzem um mapa de classe de cobertura e uso do solo. A partir dessa classificação, foi realizado o download do bioma Mata Atlântica e então realizado o recorte da área da bacia do Rio Fragoso para todos os anos disponíveis.

Para análise de acurácia dos mapas produzidos, foram gerados 85.000 pontos aleatórios, distribuídos por todo o território brasileiro. Os pontos foram inspecionados por uma equipe independente do Laboratório de Processamento de Imagens da Universidade Federal de Goiás (LAPIG - UFG), sobre imagens Landsat do período seco/úmido, com uma ferramenta livre desenvolvida pelo laboratório (Temporal Visual Inspection - TVI - tvi.lapig.iesa.ufg.br). Cada ponto foi inspecionado por 3 intérpretes diferentes e os pontos não concordantes foram validados por um intérprete sênior para decisão final. Os pontos de acurácia foram comparados aos mapas para geração da matriz de confusão e cálculo da acurácia global por bioma, além de erros de omissão e comissão por classe de cobertura e uso da terra, para cada ano. As informações detalhadas da acurácia podem ser consultadas no site do projeto (ROSA,2019).

5.3 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O MODELO PCSWMM

O software PCSWMM possui uma interface com o ambiente GIS, facilitando dessa maneira a inserção das sub-bacias e condutos, obtidos anteriormente com a delimitação da bacia. A microdrenagem não foi considerada nessa análise devido à ausência de dados. Foram inseridos Junções/Nós atribuindo-lhes cotas topográficas, Condutos indicando comprimento, coeficiente de Manning e seção. Também foram adicionadas nas sub-bacias os parâmetros e variáveis apresentadas a seguir. Para o exutório foi considerada a curva de maré.

Os parâmetros necessários para a simulação hidrológica da área em estudo são as características físicas de cada sub-bacia contribuinte (área, percentual de área permeável e impermeável, largura representativa, declividade, coeficiente de rugosidade de Manning e altura do armazenamento em depressões). Outras variáveis como precipitação, infiltração, maré também foram analisados e aplicados ao modelo, os quais serão detalhados a seguir.

5.3.1 Delimitação e caracterização das sub-bacias

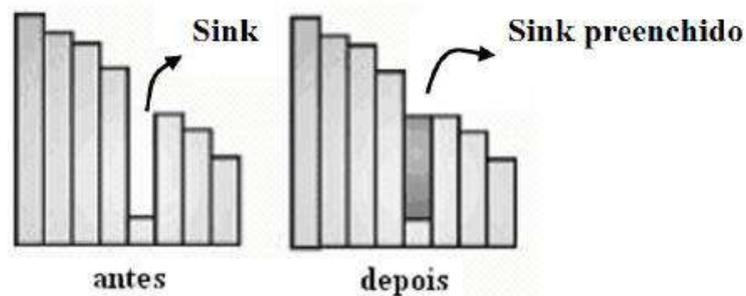
Para o processo de delimitação da sub-bacia do Fragoso e posteriormente as sub-bacias, foi utilizado dados do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que realizou a

varredura a laser e obteve ortoimagens de alta resolução de toda a superfície territorial pernambucana, obtendo o modelo digital do terreno (MDT), com precisão altimétrica melhor que 25 cm com uma escala de 1:5.000. A tecnologia utilizada para obtenção das imagens é a LiDAR (Light Detection and Ranging), com captura de dados realizada por sensores e câmeras instaladas em aviões (CIRILO et. al, 2014).

Os serviços contratados pelo Pernambuco Tridimensional incluíram recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser em dois níveis de precisão e passaram por três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica. Com os dados obtidos foi elaborado o MDT da bacia analisada.

Finalizada a etapa de obtenção do MDT, foram feitas correções por meio da função “fill sinks”, que considera as altitudes dos “pixels” vizinhos para preencher os “sinks”, promovendo, assim, uma consistência melhor no dado. O preenchimento dessas pequenas depressões é o primeiro tratamento dado à matriz de altitudes (Figura 26). Essas depressões ou “sinks” são consideradas empecilhos ao escoamento durante a aplicação de modelos hidrológicos, sedimentológicos e de poluentes de origem difusa (SOBRINHO, 2010).

Figura 26 – Correção de erros do tipo “sink” por meio da execução da função “fill sinks”.

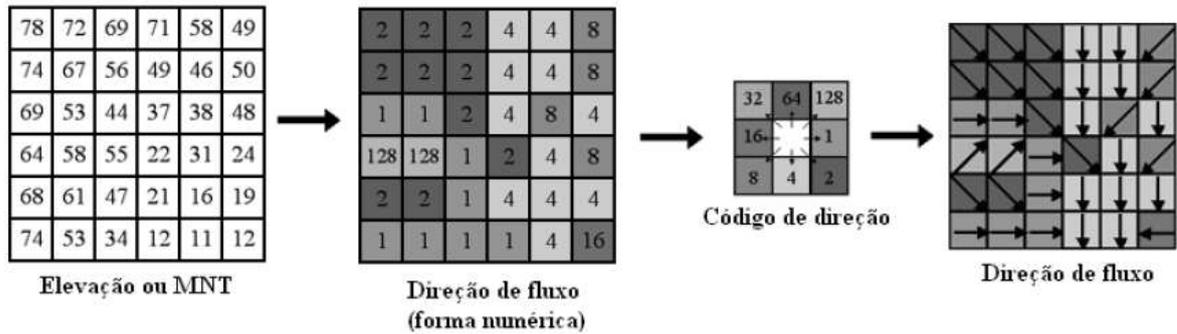


Fonte: Sobrinho (2010).

Então, foram procedidas as análises, no software Qgis 2.14.18, com uso da ferramenta TauDEM para delimitação da bacia. Obteve-se a orientação de fluxo de água na rede de drenagem através das opções: TauDEM > Basic Grid Analysis Tools > D8 Flow directions. Este processo gera uma grade regular que define as direções de fluxo, tomando por referência a linha de maior declividade do terreno.

A nova grade numérica gerada determina a direção de maior declividade de um “pixel” em relação a seus oito “pixels” vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada “pixel”, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção (Figura 27) (SOBRINHO, 2010).

Figura 27 – Exemplo de execução da função “flow Direction”.



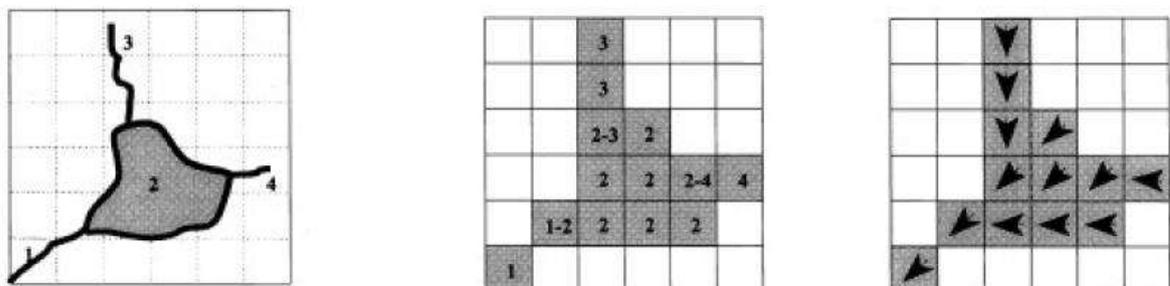
Fonte: Adaptado de ESRI (2008).

O fluxo acumulado indica o grau de confluência do escoamento, também pode ser chamado de área acumulada, e é calculado a partir do grid de direção de fluxo. O grid de área acumulada grava o número de células que drenam para cada célula do raster. Sabendo-se disso, o passo seguinte consistiu na definição da área de contribuição. Este processo foi realizado pelas opções: TauDEM > Basic Grid Analysis Tools > D8 Contributing Area. Foram atribuídos os parâmetros solicitados e executado o processo.

A área acumulada é calculada a partir do grid de direções de fluxo. O grid de área acumulada grava o número de células que drenam para cada célula do raster. Sob o ponto de vista físico, o grid de área acumulada é a área de drenagem medida em unidades de células.

Na Figura 28, exemplifica-se o fluxo acumulado, sendo possível observar a formação dos caminhos preferenciais de fluxo que originam a rede hidrográfica. A partir da grade regular gerada, conforme descrito na etapa anterior, o fluxo acumulado foi obtido pela função “flow accumulation” (SOBRINHO, 2010).

Figura 28 – Exemplo de determinação do fluxo acumulado.



Fonte: Adaptado de TURCOTE et al. (2001).

Também nesta etapa, foi definido o ponto de exutório para a bacia que se deseja delimitar. Assim, criou-se um shape de ponto a partir do caminho: Camada > Criar Camada >

Camada do tipo shape. Neste último menu, a camada foi identificada “secao” e referenciada ao sistema de coordenadas “Sirgas 2000 / UTM zone 25s”. Com a operação Stream Reach and Watershed (do TauDEM > Stream Network Analysis Tools) obteve-se como resultado um arquivo raster com mini-bacias definidas. Após este processo, foi realizada a conversão das mini-bacias para vetor. Por fim, foi realizada a união das mini-bacias. O resultado dessa operação foi um arquivo shape com a bacia representada com um só polígono. Uma vez definidas as áreas de contribuição, outras características de cada subárea foram obtidas para inserção no modelo.

5.3.2 Taxa de impermeabilização

Para determinação deste parâmetro, foram utilizadas imagens georreferenciadas do satélite Landsat 8 OLI-TIRS de 27/08/2018, órbita/ponto 214/065, disponibilizadas pelo United States Geological Survey (USGS). A imagem datada foi escolhida devido a menor presença de nuvens. Foi realizado no software ArcGIS versão 10.2.2 uma nova classificação não supervisionada do solo, visto que o interesse é apenas na identificação das áreas permeáveis e impermeáveis para cada sub-bacia de estudo. Por esse motivo não foi utilizado a classificação obtida do MapBiomas.

A classificação foi realizada segundo a concordância dos pixels e as características das bandas que compõem a imagem, resultando em uma malha com classificações diferentes. A partir daí o usuário pode, através da análise visual, unir diferentes classes com características de permeabilidade semelhantes.

5.3.3 Largura média das sub-bacias

Para obtenção deste parâmetro, foi utilizada a fórmula da largura (L_e) do retângulo equivalente de cada subárea, apresentado pela Equação 10, que é função do coeficiente de compacidade (k_c), apresentado pela Equação 11.

$$\text{Largura equivalente: } L_e = \frac{K_c * \sqrt{A}}{1,12} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (10)$$

$$\text{Coeficiente de compacidade: } K_c = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

Em que A – área da subárea considerada, em km²; P – perímetro da subárea considerada, em km; Kc – coeficiente de compacidade.

5.3.4 Declividade média das subáreas

As declividades superficiais das subáreas foram obtidas através das diferenças de nivelamento topográficos dos riachos correspondentes a cada bacia. Para isso foram utilizados os valores de altitude a partir do Modelo Digital do Terreno obtido a partir do PE3D.

5.3.5 Coeficiente de rugosidade de Manning para as áreas permeáveis e impermeáveis

Para este parâmetro foi levado em consideração as características do solo em estudo. Em relação as áreas impermeáveis, foi observado que em sua maioria é composta por telhados das edificações e ruas pavimentadas, com valor proposto pelo manual do SWMM de 0,024. Para as áreas permeáveis, compostas por áreas de reflorestamento, terras agricultáveis, vegetação rasteira e solo exposto, foi adotado o coeficiente de rugosidade de 0,15.

5.3.6 Altura de armazenamento em depressões de áreas permeáveis e impermeáveis

Para a definição deste parâmetro, que consistem nas condições de retenção da água da chuva na superfície, o SWMM sugere valores em função da natureza da superfície do solo. Nesse caso, nas áreas impermeáveis, por sugestões do modelo, consideraram-se depressões de 0,10 polegadas (2,54mm), de uma maneira geral. Já nas áreas permeáveis, adotaram-se depressões no valor de 0,20 polegadas (5,00mm), referente a superfície com grama ou pastagem (valor sugerido pelo modelo) (BARBOSA, 2015).

5.3.7 Definição da chuva de projeto

O modelo SWMM dispõe de diferentes formatos de arquivos de dados de chuva, assim como um formato padrão definido pelo usuário. As principais propriedades do objeto pluviômetro a serem fornecidas são:

- Tipo de dados de chuva (por exemplo, intensidade da chuva, volume, ou volume acumulado);
- Intervalo de tempo dos dados (por exemplo, cada hora, cada 15 minutos etc.);
- Origem dos dados de chuva (especificando se é uma série temporal definida pelo usuário ou um arquivo externo).

Dentre estes, optou-se pelo lançamento do volume precipitado no intervalo de gravação, coincidente com a apresentação dos dados das estações pluviométricas do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), consideradas no presente estudo.

5.3.7.1 Precipitação na área de estudo

Para alimentação do modelo hidrológico, como dado de entrada, foram utilizados dados horários de seis estações pluviométricas operadas pelo Cemaden. O evento simulado ocorreu no dia 30 de maio de 2016, com duração de 16 horas, iniciando as 00:00.

Os impactos decorrentes desse evento refletiram-se em suspensão de aulas de dezenas de escolas e faculdades públicas e privadas, assim como expediente em empresas privadas e órgãos públicos. A mobilidade urbana também foi comprometida, inclusive para ônibus e caminhões. A Figura 29 e Figura 30 mostram alguns dos transtornos ocasionados com esse evento de precipitação analisado.

A recorrência calculada para este evento foi maior que 100 anos, com base na equação IDF do Recife, desenvolvida no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife, em 2015 (PDDU, 2015). A partir desse evento foi possível realizar a calibração do modelo, que será especificado a diante.

Figura 29 – Afundamento do trecho do calçadão em Olinda – 30/05/2016



Fonte: Portal Globo G1 de Notícias (2016).

Figura 30 – Carro coberto pela água na Avenida Pan Nordestina, em Olinda – 30/05/2016



Fonte: Portal Globo G1 de Notícias (2016).

A Tabela 3 apresenta as estações pluviométricas utilizadas operadas pelo Cemaden e a localização de acordo com as coordenadas geográficas, assim como o total precipitado para cada estação.

Tabela 3 – Dados das estações pluviométricas utilizadas na área de estudo para o período de 16 horas no dia 30 de maio de 2016

Estação Pluviométrica	Latitude	Longitude	Total precipitado (mm)
Jardim Fragoso - Olinda	295723.39	9116966.29	241.5
Tabajara - Olinda	294063.97	9118175.53	230.6
Bonssucesso - Olinda	295955.84	9114312.68	212.9
Aguazinha - Olinda	291982.10	9115290.13	196.3
Águas Compridas - Olinda	289217.41	9117047.20	162.3
Janga 2 – Paulista	298244.65	9120295.82	210.2

Fonte: A Autora (2021).

5.3.7.2 Dados obtidos pela Equação de Chuva Intensa do Recife

A cidade do Recife dispõe de 2 equações de chuva elaboradas pelas consultoras EMCIBRA, contratada pela Prefeitura do Recife no final da década de 1970, e Acqua-Plan, contratada pela FIDEM em 1980; onde foram tomados com base os dados históricos entre 1926 e 1977 observados nos postos de Olinda e do Curado. Ressalta-se que apenas a da EMCIBRA (Equação 12) foi obtida especificamente para a cidade do Recife; já a elaborada pela Acqua-Plan, refere-se à região metropolitana do Recife-RMR. Neste estudo a consultora estabeleceu duas equações (Equação 13 e 14).

Equação da chuva elaborada pela consultora Emcibra em 1978 (COUTINHO et al, 2013):

$$i = \frac{335,47x T^{0,218}}{(t + 4)^{0,539}} \quad (12)$$

Sendo: T o tempo de retorno em anos e t a duração da precipitação em minutos

Equação da chuva elaborada pela Acqua-Plan, em 1980, para a RMR. Adota-se o valor máximo entre as expressões (13) e (14), (COUTINHO et al, 2013).

$$i_1 = \frac{456,768 x (T - 1,5)^{0,117} x (1 - 4,54x10^{-21}x t^8)}{\left(\frac{t}{60} + 6\right)^{0,58111}} \quad (13)$$

$$i_2 = \frac{72,153 * (T - 1,75)^{0,173}}{(t + 1)^{0,74826}} \quad (14)$$

Uma atualização da equação IDF para a cidade do Recife foi realizada por Ramos e Azevedo (2010) (Equação 15), a partir de uma série de 40 anos (de 1968 a 2007) para o posto pluviográfico situado no Aeroporto Internacional dos Guararapes.

$$i = \frac{1423,97x T^{0,1124}}{(t + 21)^{0,7721}} \quad (15)$$

Nesta expressão, T é o período de retorno em anos, t a duração da chuva em minutos, e i a intensidade de precipitação em mm/h.

No Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife, foi gerada uma nova equação de chuva intensa para a cidade de Recife. A nova equação IDF do Recife (Equação 16), disponibilizada pela Emlurb, foi desenvolvida com base nas precipitações de máximas anuais obtidas de três postos – Recife/Caxangá, Recife/Curado e Recife/Várzea (Emlurb, 2014).

$$i = \frac{611,3425 x T^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (16)$$

Onde: i = altura de precipitação de duração t (mm); i_1, i_2 = intensidade da chuva (mm/h); T = período de retorno (anos); t = duração da chuva em minutos;

A Equação 17 detalha as relações determinadas para Olinda por Pfasftetter (1957).

$$P = Tr^{(\alpha + \frac{\beta}{Tr^{0,25}})} x [0,5x t + 35 \log(1 + 10 x t)] \quad (17)$$

Sendo β = parâmetros atribuídos conforme a duração t: para t=5 min, $\beta = 0,04$; para t > 5 min, $\beta = 0,20$.

Diante das equações apresentadas, a equação do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife indica melhores resultados pois foi determinada por registros de dados pluviométricos e pluviográficos, sendo então utilizada para as análises e apresentada na Equação 16.

5.3.8 Determinação dos parâmetros de infiltração

A infiltração é o fenômeno pelo qual a água da chuva penetra na zona não saturada do solo da área permeável da sub-bacia. O SWMM permite selecionar três modelos diferentes:

- O modelo de infiltração de Horton;
- O modelo de infiltração de Green-Ampt;
- O modelo de infiltração baseado na Curva Número do SCS.

Existem vários modelos para a classificação dos solos, mas um dos mais utilizado na prática da engenharia, com um número razoável de informações disponíveis e que permite

considerar o tipo de solo e sua cobertura, é o método do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA). Assim, foi escolhido o modelo de infiltração baseado na Curva Número (SARTORI,2005).

O parâmetro *CN* (Curve Number ou número de escoamento da bacia hidrográfica) retrata as condições da camada superficial do solo, que pode variar desde uma cobertura muito permeável até uma cobertura completamente impermeável, e da camada superior de solo, que pode ter capacidade de infiltração alta ou baixa (SCHUSTER, 2014).

O *CN* é um parâmetro adimensional e seu valor varia entre 0 e 100, sendo que 0 corresponde a um solo com capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo totalmente impermeável (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Para determinar o valor do *CN* é necessário o mapa de uso e ocupação do solo na bacia (a obtenção desses dados foi indicada no item 5.2.). O tipo de solo é outra informação necessária para definição do parâmetro *CN* e foi obtido do mapa na escala 1:100.000 produzido pelo projeto Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE) (EMBRAPA SOLOS, 2001). A classificação do grupo de solo foi realizada tomando como base a metodologia apresentada por Sartori et al. (2005), em que se define o grupo hidrológico do solo a partir do tipo de solo indicado no mapa.

O próximo passo foi a execução da combinação dos mapas de uso do solo e grupo de solo para se poder definir o valor do parâmetro *CN* para cada sub-bacia. Utilizou-se a tabela apresentada no documento Technical Release 55 da *United States Department of Agriculture* (USDA,1986), que relaciona os valores de *CN* para as diferentes classes resultantes da combinação, conforme ilustração da Figura 31 a seguir. Nas áreas de água e mangue atribuiu-se o valor 100 para *CN* admitindo-se que nessas classes toda a água precipitada gera escoamento superficial.

Figura 31 – Esquema Ilustrativo para determinação do parâmetro de infiltração (*CN*)



Fonte: A Autora (2021).

5.3.9 Obtenção da curva de maré

O objeto “Curves” definido pelo PCSWMM, contém a altura das marés (ou seja, estado do nível da água no exutório) versus horas do dia ao longo de um ciclo completo de maré. Assim, utilizando como referência o evento de chuva ocorrido no dia 30 de maio de 2016, foram obtidos os registros de maré na tábua de maré do Porto do Recife, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4 e então foi realizada a curva de maré para o intervalo de tempo de 1 hora, considerando as 16 horas do evento simulado. Por meio do método analítico a partir do conhecimento das alturas de águas (H ou H1) das PM e BM que enquadram o intervalo de tempo no qual se vai efetuar o cálculo, o intervalo de tempo entre PM e BM ou BM e PM (T ou T1) e o intervalo de tempo entre o evento imediatamente anterior (PM ou BM) e a hora a que se pretende saber a altura da maré, exemplificado na Figura 32 e obtido por meio das Equações 18 e 19. Assume-se que a forma de onda de maré é sinusoidal, o que não é rigorosamente verdadeiro, mas é uma boa aproximação (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2018).

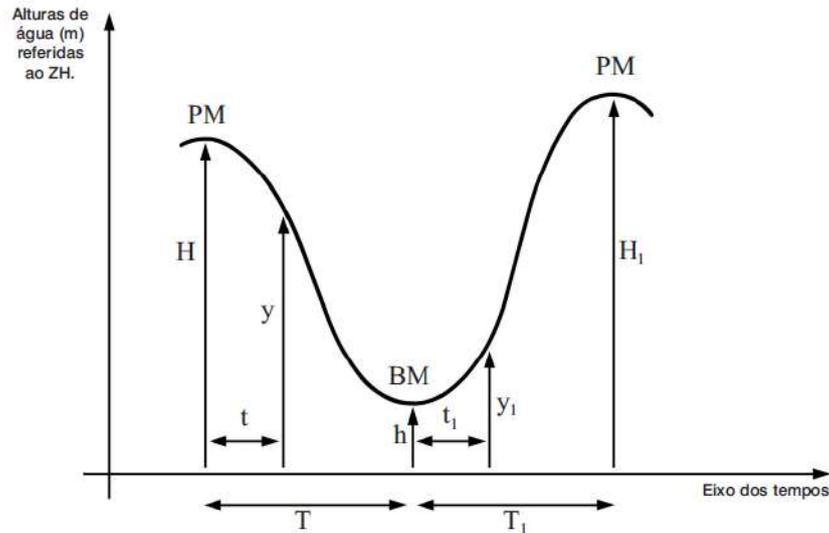
Tabela 4 - Dados da maré - 30/05/2016

Horário	Altura (m)
04:30	0,70
10:45	2,00
17:15	0,60
23:24	1,90

Fonte: A Autora (2021).

* baseado em informações do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

Figura 32 - Exemplificação do método analítico para obtenção da curva de maré



Fonte: Instituto Hidrográfico (2018).

A altura de maré (y) em qualquer instante “ t ” após uma preamará:

$$y = \frac{H+h}{2} + \frac{H-h}{2} \cos \frac{\pi t}{T} \quad (18)$$

A altura de maré (y_1) em qualquer instante “ t ” após uma baixamar:

$$y_1 = \frac{h+H_1}{2} + \frac{h-H_1}{2} \cos \frac{\pi t_1}{T_1} \quad (19)$$

Onde:

y, y_1 são o dado de maré a estimar, em m;

H e H_1 são a altura da maré máxima, em m;

h é a altura da maré mínima, em m;

t é o intervalo entre a maré a calcular e a máxima ou mínima anterior, em h;

T e T_1 são o intervalo de tempo entre as marés alta e baixa ou uma baixa e uma alta, em horas.

5.3.10 Parâmetros da alternativa de controle dentro do modelo

Para definição das características da alternativa de controle simulada neste trabalho, foi tomado como referência o manual do modelo PCSWMM. O manual define faixas de valores usuais para as características dos reservatórios de lote.

Os reservatórios de lote funcionam como uma medida de controle na fonte. O princípio de funcionamento consiste em receber o escoamento gerado no lote, por meio dos telhados e áreas impermeáveis em geral, promover o armazenamento temporário e então a descarga de vazão em níveis inferiores e depois do momento de pico.

A modelagem com o microrreservatório é realizada com apenas uma camada de armazenamento, com todo espaço nela vazio, e com um dispositivo de saída colocada acima do fundo impermeável. A Equação 20 que governa a aplicação do microrreservatório em lote, é a equação da continuidade abaixo, segundo Rossman e Huber (2016).

$$\frac{\partial d_3}{\partial t} = f_1 - q_1 - q_3 \quad (20)$$

Onde d_3 é a altura de armazenamento do reservatório; f_1 é o escoamento capturado para o reservatório; q_1 é o escoamento no fundo reservatório e q_3 é fluxo pela saída do reservatório. Nesse caso é desconsiderada a precipitação e a evaporação no reservatório.

A sequência metodológica para aplicação de microrreservatório em lotes na bacia seguiu os seguintes passos:

1. Determinação do volume a ser armazenado pelos os reservatórios (V_{det}): Método da simulação mensal.

O método da Simulação Mensal parte de um reservatório com volume predefinido para simular o comportamento do volume de água armazenado no reservatório ao longo da série histórica estudada (ABNT, 2007). Com isso, são calculados os meses nos quais o reservatório selecionado atende ou não a demanda de água pluvial. Considerando que o reservatório escolhido está cheio no início da simulação, e subtraído o volume de água consumido e é somado o volume de água captado durante o primeiro mês analisado. A partir do segundo mês, o volume inicial contabilizado e o resultante do balanço hídrico do mês anterior. O balanço acontece desse modo até o fim da série histórica considerada.

No método da Simulação Mensal, são utilizados índices pluviométricos sem tratamento estatístico. Ele é baseado na equação da continuidade, que é representada pela Equação 21:

$$S(t) = Q(t) + S(t - 1) - D(t) \quad (21)$$

Considerando que: $Q(t) = R \times P(t) \times A$; $0 < S(t) < V$; Se $S(t) < 0$, então $S(t) = 0$

Em que:

$S(t)$ = o volume de água no reservatório no mês t (m^3);

$Q(t)$ = o volume de chuva no mês t (m^3);

$S(t-1)$ = o volume de água no reservatório no mês $t-1$ (m^3);

$D(t)$ = o consumo ou a demanda no mês t (m^3);

R = o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*);

$P(t)$ = o índice pluviométrico mensal no mês t (m^3);

A = a área da superfície de captação de água de chuva (m^2);

V = o volume do reservatório escolhido (m^3).

2. Determinação das dimensões do reservatório padrão:

Aplicando o método da simulação mensal, e considerando uma área média disponível por lotes, concluiu-se que o reservatório padrão será de 5000 litros o qual possui as seguintes dimensões: altura de 1,60 metros e diâmetro 2,0 metros.

3. A quantidade total de reservatórios é distribuída aplicando a técnica escolhida em 25% e 50% das residências existentes em cada sub-bacia, estimadas de acordo com os dados dos setores censitários.

5.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Foi realizada a modelagem hidrodinâmica com auxílio do modelo computacional HEC-RAS 5.0.6 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), utilizado para determinação das manchas de inundação na bacia do rio Fragoso e estimar potenciais catástrofes para diferentes cenários.

A simulação de escoamentos em regime permanente se baseia na solução unidimensional da equação de energia de Bernoulli, sendo as perdas de energia devidas ao atrito avaliadas através da declividade da linha de energia, a qual é computada a partir da equação de Manning. Em situações nas 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 (VERÇOSA, 2019).

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 opções, a ser escolhidas pelo usuário:

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 (VERÇOSA, 2019).

A Figura 33 representa os dados de entrada para modelagem hidrodinâmica.

Figura 33 – Dados de entrada necessários para modelagem hidrodinâmica



Fonte: A Autora (2021).

No modelo para realização das simulações 2D foram utilizados o Modelo Digital do Terreno (MDT), as vazões para cada sub-bacia obtidas a partir do modelo hidrológico PCSWMM e os dados de maré interpolados a cada hora. O MDT foi obtido por meio do mapeamento do Programa Pernambuco Tridimensional, com ortofotos na escala de 1:1000 com resolução espacial de 50 cm. 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.

Para a área de estudo, as ortofotos foram obtidas em fevereiro de 2016, enquanto o laser fez a varredura em dezembro de 2015. Assim, foram comparadas com imagens do Google Earth as alterações ocorridas no terreno, entre dezembro de 2015 e maio de 2016, período que ocorreu o evento de precipitação que será utilizado para calibração, visto que estavam ocorrendo as obras do Canal do Fragoso.

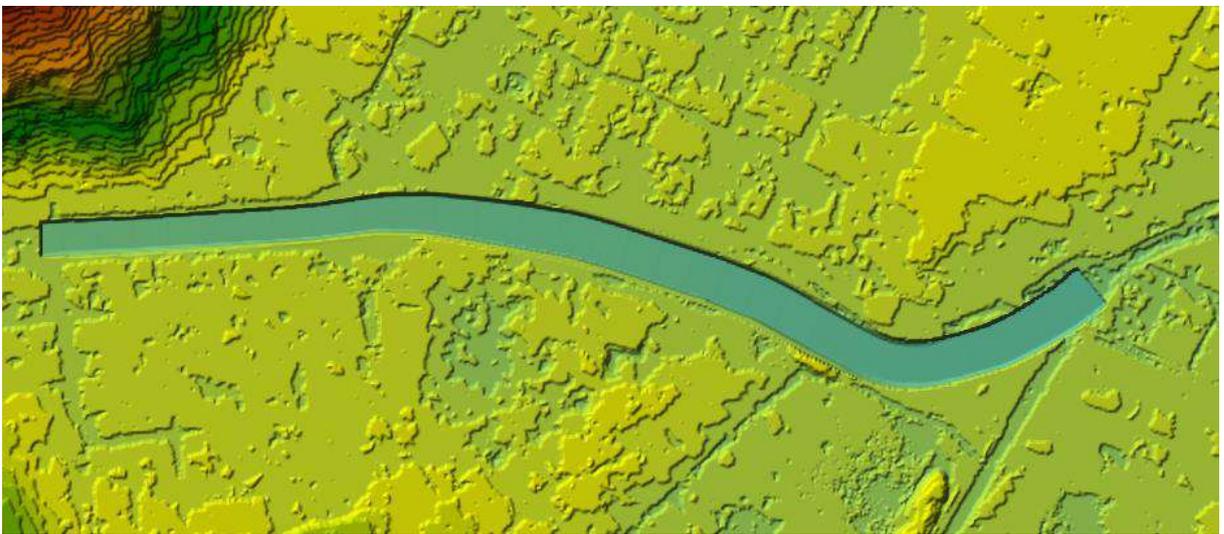
Dessa maneira, se mostrou necessário a alteração do MDT, por meio do software em sua versão estudante do Civil 3D e os dados de seção obtidos através do projeto, para tornar as condições o mais próximo possível da realidade do evento analisado. A Figura 34 mostra a obra em andamento através das ortofotos em fevereiro e o avanço até maio no ano de 2016. Com a Figura 35 pode-se observar o MDT com as alterações realizadas.

Figura 34 – Comparação das imagens obtidas a partir das ortofotos (à esquerda) e o Google Earth (à direita) para análise da alteração do terreno.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 35 – Alteração realizada no MDT com o rio canalizado em maio de 2016.



Fonte: A Autora (2021).

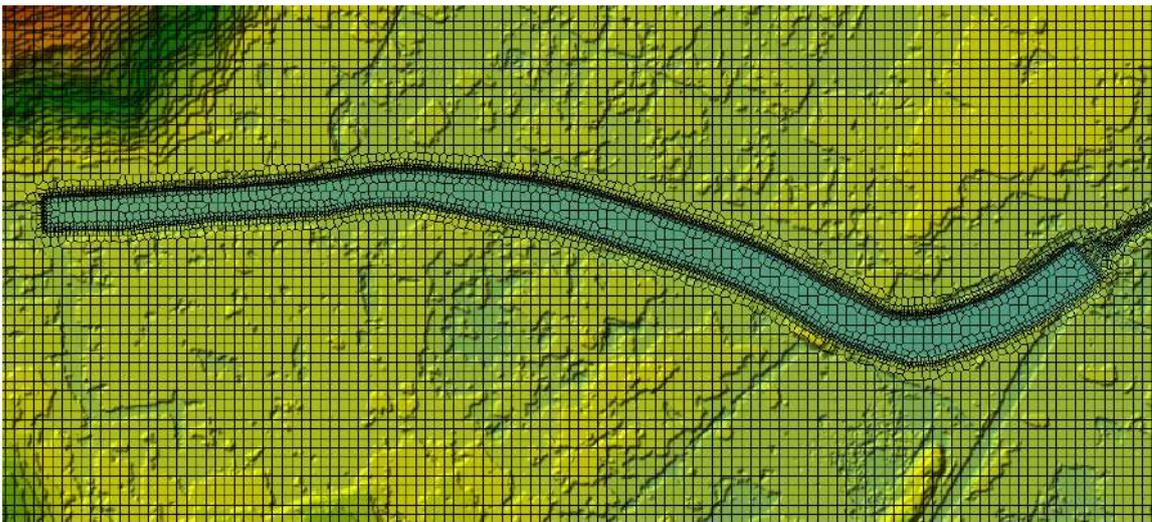
A definição das características geométricas do HEC-RAS 2D para a construção da malha computacional de escoamento foi efetuada considerando, células quadradas com 10 m de lado para a geração dos mapas de extensão da inundação e de profundidades dos picos de cheias. Foram testadas malhas quadradas com 2 m e 5m, em busca de mais precisão para o modelo, mas não foi obtido estabilidade. O tamanho e a localização das células de Fluxo 2D são definidos pelo usuário e, portanto, o processo requer o conhecimento a priori da morfologia e das vias de escoamento na planície de inundação. Esse conhecimento da área de estudo é importante porque o HEC-RAS define nos resultados uma única elevação da superfície da água para cada célula e cada face da célula. O gradiente hidráulico da célula é calculado em duas dimensões utilizando as equações completas de Saint Venant ou a equação da onda de difusão, juntamente com a equação da conservação da massa.

O software foi projetado para uso de malhas computacionais estruturadas ou não estruturadas. Isso significa que as células computacionais podem ser em forma de triângulos, quadrados, retângulos ou até mesmo elementos de cinco e seis faces, não sendo necessário possuir tamanhos iguais. O contorno exterior da malha computacional é definido por um polígono. As ligações entre as áreas de fluxo 1D e 2D são estabelecidas através do uso de uma estrutura de conexão como, por exemplo, um dique marginal que para o caso do estudo, funciona apenas como uma ligação, sem eficiência de descarga.

A malha computacional permite controlar o movimento da água através da área de fluxo 2D. Especificamente, a elevação da superfície da água é calculada para cada centro de célula. O movimento do escoamento entre células baseia-se no perfil da face entre células, ou seja, as células computacionais não necessariamente possuem fundo plano e as faces celulares não precisam ser lineares, com uma única elevação. Em vez disso, cada célula e face das células computacional baseiam-se nos detalhes do terreno de base.

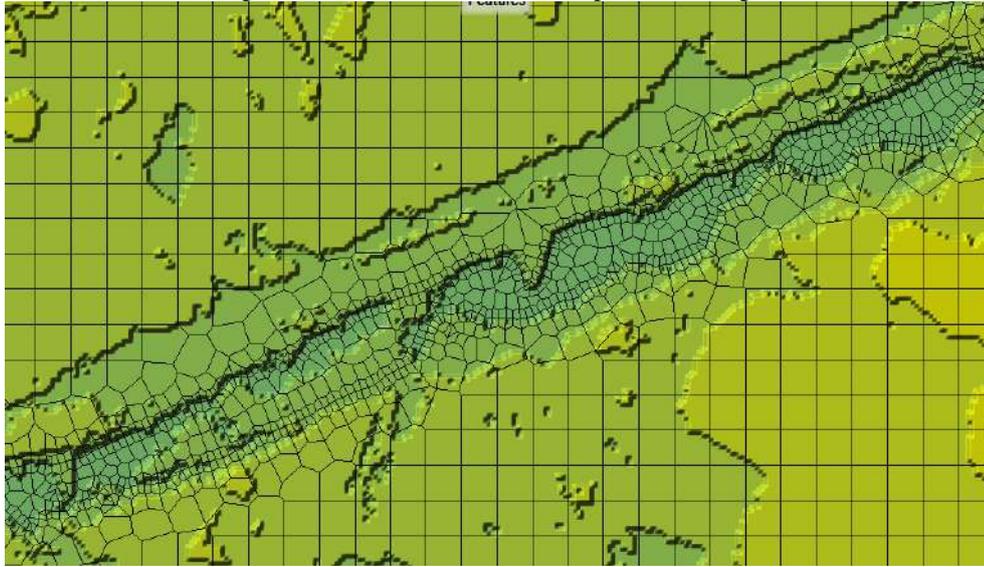
Para a região do rio Frágoso canalizada e natural, região de maior interesse, foi realizado um refinamento da malha através do uso de linhas de quebra (*BreakLines*) e então redução do tamanho das células, com o objetivo de orientar o escoamento e aumentar a precisão do modelo. As dimensões das células nas áreas refinadas variaram entre 2m x 2m até atingir as dimensões da malha original de 10m x 10m. A Figura 36 e a Figura 37 mostram a malha bidimensional gerada sobre o MDT para o rio Frágoso canalizado e o natural.

Figura 36 – Refinamento da malha para o rio Frágoso canalizado.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 37 - Refinamento da malha para o rio Fragoso natural

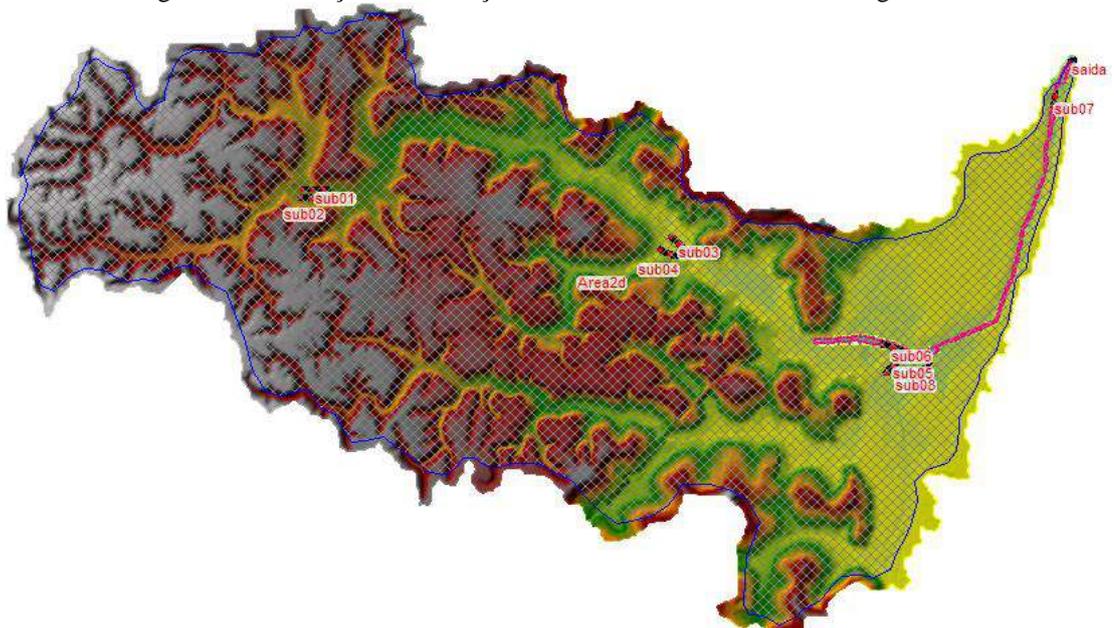


Fonte: A Autora (2021).

Foi determinado o coeficiente de rugosidade de Manning especializado para toda a bacia, utilizando como referência o mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2016. A espacialização ficou dividida em 6 classes: área urbana, pastagem, agricultura, floresta, rio canalizado e rio natural.

Foram determinadas as condições de contorno internas para cada sub-bacia (1 a 8), inserindo os respectivos hidrogramas de entrada para o evento hidrológico simulado, com intervalo de tempo a cada minuto. Como condição de contorno de saída, foi definido a curva de maré no exutório da bacia, exemplificado na Figura 38.

Figura 38 – Indicação das condições de contorno na bacia do Rio Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

O passo de tempo utilizado para as simulações foi de 1 minuto, assim como os intervalos de resultados, atendendo as condições de Courant. O pós-processamento das simulações bidimensionais foi realizado na aplicação RasMapper, utilizando o evento de 30 de maio de 2016 (calibração), 24 de julho de 2019 (validação) e os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

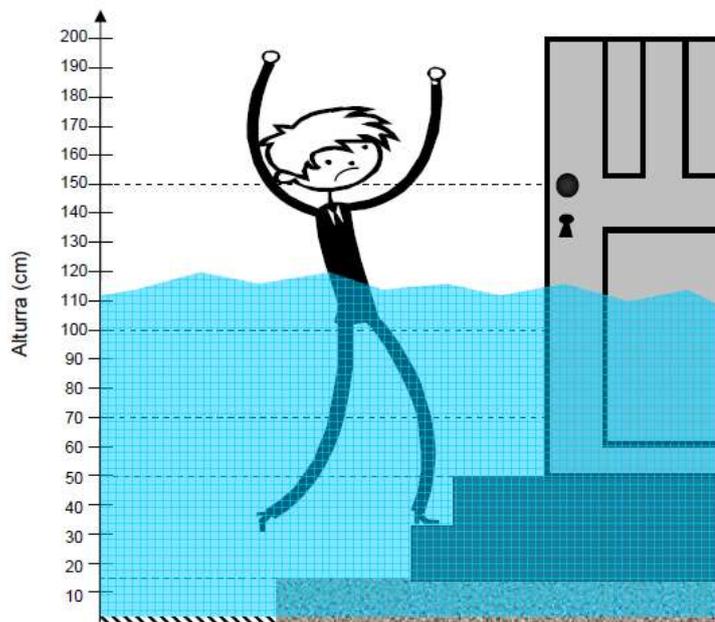
Para caracterização do nível de perigo, foi utilizada a profundidade como um fator importante para ser analisado em cenários de pós-enchentes. Quanto à categorização, foi escolhida a classificação desenvolvida por Zonensein (2007), em que apresenta a normalização de profundidades em cinco faixas definidas de maneira empírica apresentadas na Tabela 5 e ilustrada na Figura 39.

Tabela 5 – Faixas de normalização da cota de inundação

Cota (cm)	Efeito
<10	O meio-fio costuma ter aproximadamente 15cm de altura, de maneira que a 10cm a água está limitada às ruas.
50	Com 50cm a inundação inunda ruas, além de parques, calçadas, canteiros, quintais e estacionamentos. Pode interromper tráfego de veículos e principalmente de pessoas, podendo invadir casas mais simples, com soleiras próximas ao nível das calçadas.
70	A 70cm a água muito provavelmente já invadiu o interior de casas, causando danos a sua estrutura e conteúdo.
100	A esta altura a água atinge praticamente todos os bens no interior das casas.
> 150	Esta profundidade atinge não só bens, mas também é suficiente para causar afogamentos.

Fonte: Zonensein (2007)

Figura 39 – Representação das faixas de normalização da profundidade



Fonte: Zonensein (2007).

5.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo hidrodinâmico se deu pela determinação do valor de Manning mais adequado e estável para a simulação do evento extremo de precipitação ocorrido no dia 30 de maio de 2016.

Com a ausência de estações fluviométricas, foram analisadas de forma simplificada as alturas das manchas de inundação e confrontadas com 20 pontos medidos por uma equipe de topógrafos após o evento mencionado, por iniciativa da equipe gestora da obra do Canal do Fragoso em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco. Os valores de rugosidade foram modificados manualmente repetidas vezes até que os pontos observados e simulados fossem adequadamente próximos em simulações estáveis.

Para avaliação estatística do desempenho do modelo, foram comparados os dados observados e simulados com base em diversos critérios mencionados a seguir.

- **Coefficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE):** O analisado coeficiente avalia estatisticamente a precisão do modelo, sendo considerado o melhor na análise do ajuste dos dados simulado ao observado. Seu valor fica entre $-\infty$ e 1, e quanto maior valor, melhor a concordância entre o simulado e o observado (Nash & Sutcliffe, 1970). O NSE é calculado como mostra a Equação 22 a seguir:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{médiaobs})^2} \quad (22)$$

- **Coefficiente de determinação (R^2):** Número que descreve o nível de correlação linear entre os dados simulados e observados. Muito embora seu uso seja bastante comum na modelagem, o R^2 pode ser considerado índice instável, sendo insensível para alguns fatores e extremamente sensível para outros, como no caso de picos de vazão. Seu valor fica entre 0 e 1, e quanto maior o valor melhor a concordância entre o simulado e o observado. A fórmula para seu cálculo é exemplificada na Equação 23 a seguir:

$$R^2 = \frac{\sum (Y_{obs} - \bar{Y}_{médiaobs}) (Y_{sim} - \bar{Y}_{médiasil})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{médiaobs})^2 (Y_{sim} - \bar{Y}_{médiasil})^2} \quad (23)$$

- **Percent Bias (PBias):** Este índice representa a diferença de volume entre os fluxos simulado e observado, com o ideal sendo representado pelo zero, valores negativos e positivos indicam superestimação e subestimação, respectivamente.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs})} \right] \quad (24)$$

- **RSR:** Este índice padroniza o RMSE, através da taxa de desvio padrão dos dados. É o quociente da raiz do erro médio quadrático pela raiz do desvio padrão dos dados observados. O RSR varia do valor ideal 0, que indica zero RMSE ou variação residual e, portanto, perfeita simulação do modelo, a um grande valor positivo. Quanto menor o RSR, menor o RMSE e melhor o desempenho da simulação do modelo (Moriasi et al., 2007). O RSR é obtido através da Equação 25:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left| \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2]^{1/2}}{[\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{mediaobs})^2]^{1/2}} \right| \quad (25)$$

Onde: Y_{obs} é o evento observado; Y_{sim} , o evento simulado pelo modelo; $\overline{Y_{mediaobs}}$ corresponde à média do evento observado no período de simulação; $\overline{Y_{mediasim}}$ corresponde à média do evento simulado no período de simulação e n, o número de eventos.

Zappa (2002) propõe valores acima de 0,5 para NSE. Gotschalk e Motovilov (2000, apud Van Liew et. al. (2007), classificam como muito bons os valores de NSE acima de 0,75 e aceitáveis entre 0,75 e 0,36, seja para passo de tempo diário ou mensal, assim como Silva et al. (2008). Moriasi et al. (2007) classificam os indicadores de desempenho R^2 com valores acima de 0,5 como satisfatórios e os demais NSE, Pbias e RSR para calibração e validação tem seus valores de desempenho indicados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Valores de desempenho recomendados para simulações mensais

Valores de desempenho recomendados para simulações mensais	NSE	PBIAS (%)	RSR	R ²
Ótimo	0,75 a 1,00	< ± 10	0 a 0,5	0,7 a 1,0
Bom	0,65 a 0,75	De ± 10 a ± 15	0,5 a 0,6	0,6 a 0,7
Satisfatório	0,50 a 0,65	De ± 15 a 25	0,6 a 0,7	0,5 a 0,6
Insatisfatório	< 0,50	> ± 25	> 0,7	< 0,5

Fonte: Adaptado de: Moriasi et al., 2007; Ayele et al., 2017.

5.6 VALIDAÇÃO

A validação ocorreu com o evento de precipitação intensa ocorrido em 24 de julho de 2019, comparando as manchas de inundação obtidas com o modelo hidrodinâmico e as imagens de drones, notícias de jornais locais e visita técnica.

5.7 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As modelagens permitem construir cenários a fim de comparar os impactos das diferentes propostas. Inicialmente, foi simulado um cenário estimando as condições originárias da bacia, sem medidas compensatórias. O segundo cenário abordou as condições futuras de finalização da obra de macrodrenagem da bacia. O terceiro avaliou a aplicação da técnica compensatória reservatório de lote.

As intensidades das precipitações foram variadas através da mudança do tempo de retorno dos eventos, para o qual foram considerados os valores de 2, 10, 25, 50 e 100 anos, tendo assim uma maior variabilidade na intensidade da precipitação.

5.7.1 Cenário 1 – Canal parcialmente construído (condições em 2019)

Estes cenários tiveram como objetivo analisar os valores de escoamento e manchas de inundação antes da implantação dos reservatórios de lote e a finalização da obra de canal do Fragoso. Foram analisados 5 cenários sem alternativa de controle, um para cada tempo de retorno ($T= 2, 10, 25, 50$ e 100 anos) e outros dois, um considerando o evento de precipitação do dia 30 de maio de 2016 e o outro em 24 de julho de 2019. Os resultados estabeleceram uma base para comparação com os valores obtidos após a implantação de alternativas de controle.

5.7.2 Cenário 2 - Conclusão da obra do canal do Fragoso

Estes cenários tiveram como objetivo analisar a região de estudo após a conclusão da obra do canal do Fragoso. Também foram analisados 5 cenários, um para cada tempo de retorno ($T= 2, 10, 25, 50$ e 100 anos) e outros dois, um considerando o evento de precipitação do dia 30 de maio de 2016 e o outro em 24 de julho de 2019.

5.7.3 Cenário 3 – Canal construído e Reservatórios nos lotes

Foram avaliados os principais parâmetros que devem ser levados em conta para adequação dos diferentes tipos de soluções a um determinado contexto local, recomendados pelo Guia do profissional em treinamento para técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas da Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental (2007).

Com relação aos Aspectos Físicos devem ser levados em conta os seguintes parâmetros:

- Topografia do local;
- Capacidade de infiltração do solo;
- Estabilidade do subsolo;
- Nível das águas subterrâneas; e
- Aporte permanente de água.

Com relação aos Aspectos Urbanísticos e de Infraestrutura devem ser levados em conta os seguintes parâmetros:

- Disponibilidade de espaço;
- Inclinação e forma dos telhados; e
- Redes existentes.

Com relação aos Aspectos Sanitários e Ambientais devem ser levados em conta os seguintes parâmetros:

- Risco de poluição;
- Risco de água com finos; e
- Risco sanitário associado à proliferação de doenças.

Com relação aos Aspectos Socioeconômicos devem ser levados em conta os seguintes parâmetros:

- Percepção da população próxima à área com relação à estrutura a ser implantada; e
- Critérios relativos à manutenção e ao custo.

Com base na análise desses parâmetros, foi escolhida a técnica compensatória de reservatório de lote, como a mais adequada para a região escolhida.

5.8 LAGOA DO FRAGOSO

Os reservatórios de amortecimento de picos de vazão, popularmente conhecidos como “piscinões”, são estruturas de acumulação temporária das águas de chuva, que contribuem para a redução das inundações urbanas. Podem ser do tipo detenção (liberam toda a água após a chuva) ou retenção (mantém uma lâmina d’água residual).

Um pouco mais de 10 anos atrás a prefeitura de Olinda contratou um projeto para bacias de amortecimento na bacia do rio Fragoso, mas infelizmente não houve recursos para realizar as obras. O projeto foi desenvolvido pela empresa ATP – Engenharia Ltda, em 2009, e apresentado ao Departamento de Estradas e Rodagem de Pernambuco – DER-PE. A solução adotada para ser implementada no momento do projeto foi a construção de duas lagoas, uma no trecho médio do rio Fragoso e outra na foz do riacho Ouro Preto.

A área destinada à lagoa Ouro Preto sofreu muitas invasões e teve parte de sua área intensamente ocupada por moradias, de modo que a prefeitura concluiu que não existem mais condições de construir a lagoa Ouro Preto por causa do impacto social e econômico que iria causar.

Neste contexto, a prefeitura de Olinda planejou aumentar a lagoa do Fragoso para compensar o efeito de amortecimento que se perdeu quando não foi construída a Lagoa Ouro Preto. O estudo para o referido aumento da lagoa do Fragoso foi realizado pelo IAUPE (Instituto de Apoio à Universidade de Pernambuco) em 2019.

O desenvolvimento do citado estudo incluiu uma análise hidrológica para determinação das chuvas intensas e hidrogramas de vazões com diferentes tempos de retorno, uma análise hidrodinâmica para propagação das vazões e a última etapa, com o mapeamento da superfície da água nos rios e lagoa, com a identificação das cotas máximas atingidas nas condições simuladas.

Para representação do relevo, os autores utilizaram dados do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), para a modelagem hidrológica da bacia utilizaram o software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), e para a modelagem hidrodinâmica foi utilizado o programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), realizando a análise de inundações em escoamento unidimensional (1D) e bidimensional (2D).

O estudo concluiu que para manter o mesmo nível de segurança do projeto anterior que foi planejado para um tempo de retorno de 25 anos, é necessário realizar o aumento da capacidade da Lagoa Fragoso com um rebaixamento do fundo da lagoa de 1,00 m, a

colocação de uma galeria de saída e o reposicionamento do vertedor principal. Além disso, é necessário o alargamento da calha do Ouro Preto para uma largura de 25 metros para evitar alagamentos no seu entorno.

O estudo ainda alerta que a cidade de Olinda tem algumas áreas muito baixas de modo que a avenida perimetral que será construída ficará em alguns pontos com cota mais elevada que as ruas locais. Para cada um dos locais muito baixos é necessário fazer uma análise das condições de escoamento das águas pluviais e adotar soluções localizadas.

A lagoa do Fragoso não foi construída e pelas informações obtidas não existem recursos para sua construção no momento, de modo que na presente dissertação, a lagoa do Fragoso não foi levada em consideração.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o avanço da urbanização da Bacia do rio Fragoso, as características geomorfométricas e as diversas simulações realizadas na modelagem hidrológica e hidrodinâmica durante este trabalho, desde a calibração, até os diversos cenários.

6.1 DINÂMICA DA EXPANSÃO URBANA NA BACIA DO RIO FRAGOSO

O uso e ocupação do solo está diretamente associado ao avanço da urbanização e deve ser analisado para auxiliar no subsídio a gestão ambiental. Segundo Tucci (2008) é necessário relacionar o desenvolvimento urbano com algumas consequências principais como o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume de escoamento superficial, podendo ocasionar sérios problemas de inundações e alagamentos.

As classes do uso da terra da bacia do Rio Fragoso foram obtidas com base na realizada pelo Projeto MapBiomas com variação para os anos de 1985 a 2018. Nesse estudo, foram identificadas duas classes de cobertura natural (Formação Florestal e Mangue) e cinco classes de uso da terra influenciados pelo homem (Pastagem, Agricultura, Infraestrutura Urbana, Mineração e Outra área não vegetada).

Ao analisar a bacia do rio Fragoso por completo, nos anos iniciais, a Formação Florestal é encontrada com aproximadamente 29% de ocupação da área, apresentando uma pequena diminuição gradativa atingindo os 22%. A Pastagem foi analisada inicialmente com aproximadamente 22% de ocupação de área, crescendo ao decorrer dos anos atingindo 34,8% no ano de 1997 e posteriormente foi diminuído atingindo em 2018, 7% de área. Para a agricultura, o uso do solo atingiu 33%, reduzindo ao decorrer dos anos e atingindo valor final de aproximadamente 20%.

Em relação a infraestrutura urbana, para a bacia do Fragoso, temos 13,7%, crescendo gradativamente ao longo dos anos, atingindo 51% de ocupação urbana. Para a sub-bacia 6 o índice de urbanização ultrapassa 70%, e para as sub-bacias 7 e 8 ultrapassa 80% de ocupação. Em relação a mineração foram pequenas porções identificadas ao longo dos anos analisados. Segundo estudos realizados sobre o problema, pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), no final da década de 1970, mostraram sensível redução das reservas recuperáveis com aproveitamento comprometido pela ocupação habitacional. Duarte e Krauss, 1978, mencionam alguns desses dados, sugerindo uma avaliação mais precisa do

efeito restritivo imposto pela concentração demográfica, no aproveitamento das reservas conhecidas da área compreendida entre Olinda e Igarassu. Ressaltam ainda esses autores, que com o desenvolvimento urbano e a valorização dos terrenos, grande parte das reservas de fosforita ficaram situadas em áreas de grande densidade demográfica, o que, associado ao desencanto dos mineradores, dificultava uma retomada dos trabalhos de exploração (REZENDE, 1994).

Também foi possível identificar pequenas outras áreas não vegetadas (cerca de 2,3% da área total) e presença de rios ou lagos. Para os anos entre 1985 e 2007 ainda é possível identificar a presença de mangue, mesmo que em uma proporção pequena. As variações de cobertura e uso do solo para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2018 podem ser observadas na Figura 40 a seguir.

Também é possível confirmar o avanço da urbanização com os dados populacionais disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) analisando os municípios de Olinda e Paulista que compõem a maior parte da área de estudo. No ano de 2006, o município de Paulista apresentou 299.744 habitantes, passando a ter 329.117 habitantes em 2018. Para o município de Olinda, em 1940 a população era de 36.712 habitantes, em 1970 de 196.342 habitantes, alcançando 391.835 habitantes, em 2018. Atualmente, o município de Olinda é de grande densidade demográfica, com valor representativo de 9.063,58 hab/km², por possuir uma pequena área de território.

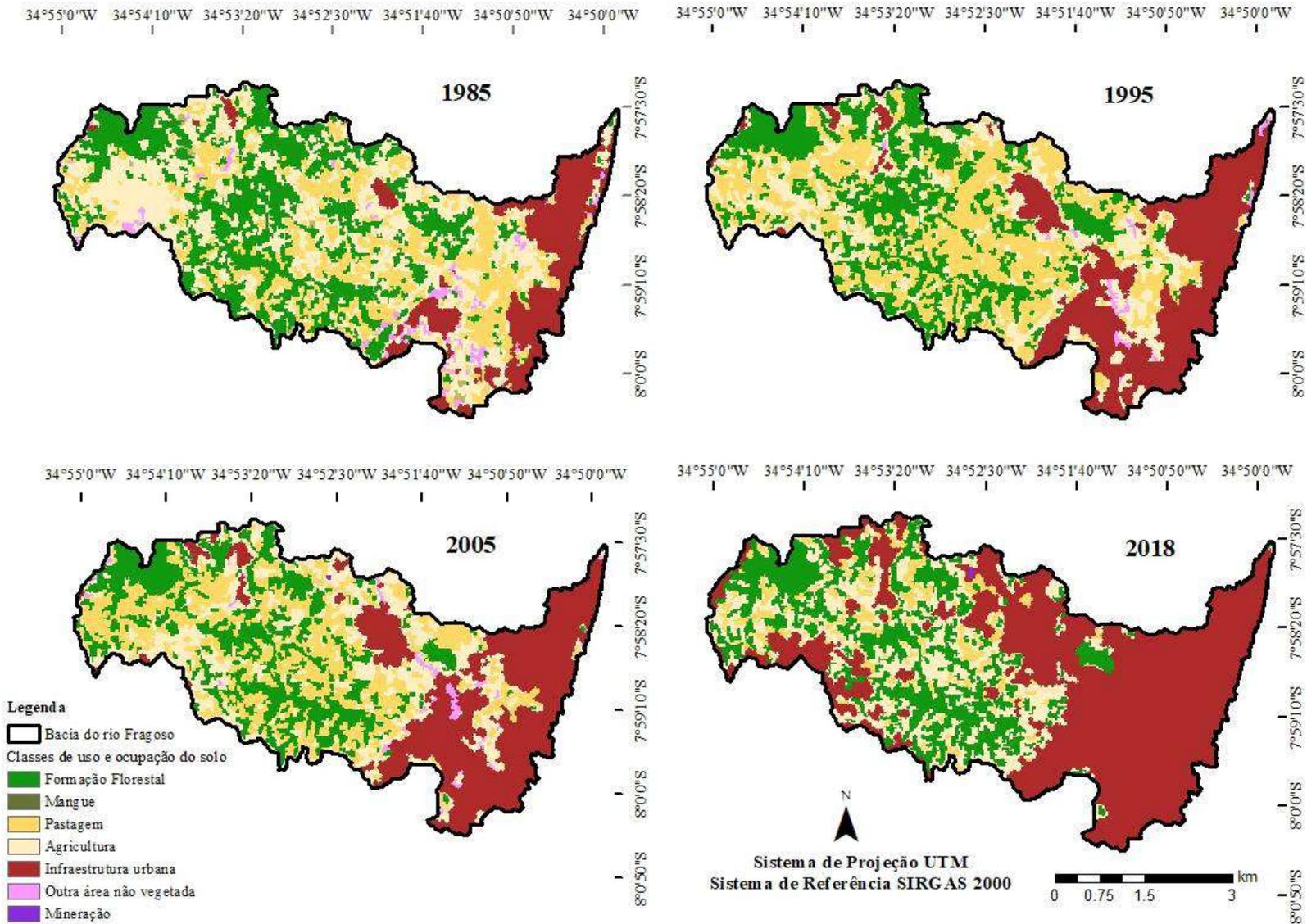
Essa região analisada era composta por grandes áreas de mangues, que perderam espaço frente a expansão urbana, restando apenas vestígios. Os manguezais são um dos ecossistemas mais produtivos do planeta, e sua importância para a manutenção de bens e serviços é enorme.

Os manguezais ainda contribuem com a redução da vulnerabilidade da zona costeira às mudanças climáticas. A região costeira apresenta elevada vulnerabilidade aos impactos relacionados às mudanças climáticas globais, que incluem alterações dos regimes de chuvas, alterações da temperatura, aumento de eventos extremos como tempestades e marés altas extremas, aumento da concentração de dióxido de carbono e elevação do nível médio do mar.

Apesar de os manguezais serem um dos sistemas mais vulneráveis às alterações previstas, esse ecossistema tem importante papel na redução da vulnerabilidade da zona costeira a essas alterações. A presença desses sistemas pode reduzir a vulnerabilidade da zona costeira à ocorrência de tempestades e eventos extremos e a inundações, além de promover a retenção de sedimentos que contribui para compensar parcialmente a elevação do nível do mar e reduzir a vulnerabilidade a processos erosivos. Como exemplo, pode ser citado o

tsunami no Oceano Índico, em 2004, em que os manguezais serviram em alguns pontos da costa, como redutor do impacto desse evento ao atingir o continente (ICMBIO,2018).

Figura 40 – Variação do uso e ocupação do solo na bacia do Rio Fragoso para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2018



Fonte: A Autora (2021).

6.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOMÉTRICAS DA BACIA DO RIO FRAGOSO

A seguir serão apresentadas as características físicas da bacia, visto que são elementos de grande importância em seu comportamento hidrológico, devido a existência de uma correspondência entre o regime hidrológico e estes elementos. As características físicas de uma bacia compõem importante grupo de fatores que influem no escoamento superficial.

A bacia do Rio Fragoso, possui uma área de 28,57 km² e um perímetro de 46,28 km. O fator de forma da bacia apresentou um valor de 0,132, ou seja, próximo de 0, sendo assim, pode-se classificá-la como uma rede de drenagem alongada, valores próximos a 1,0 indicam bacias circulares. Os valores obtidos para o coeficiente de compactidade (2,424) e o índice de circularidade (0,168) mostram também que a bacia em estudo apresenta um formato mais alongado.

Lorenzon (2014) obteve índices baixos para o fator de forma (0,17), coeficiente de compactidade (2,35) e índice de circularidade (0,18) para bacia hidrográfica do rio Benevente, Alfredo-Chaves, ES, indicando a forma alongada da bacia. Santos (2012) obteve índice de circularidade similar para a bacia hidrográfica do rio Lago Verde, TO, demonstrando ser uma bacia alongada o que indica pouca probabilidade de cheias ou inundações com escoamento superficial rápido. Apesar de o índice apontar tal fato, pondera-se que mesmo sendo alongada, os baixos valores de relevo, declividade e amplitude altimétrica condicionam a ocorrência de grandes áreas inundadas boa parte do ano, destacando para não avaliação da propensão a enchentes em uma bacia com base exclusivamente na sua forma.

O comprimento do canal principal é de 14,72km com uma rede de drenagem total de 26,253 km. A densidade de drenagem é 0,919 km/km², indicando uma baixa capacidade de drenagem, quando comparada aos limites estabelecidos por Sthraler (1957), que considera baixo valor de densidade de drenagem menor que 5.0 km/km²/ média 5,0 - 13,5 km/km²/ alta 13,5 - 155,5 km/km² e muito alta >> 155,5 km/km². A densidade de drenagem também sofre influência do clima e das características físicas da bacia hidrográfica. O clima atua tanto diretamente (regime e vazão dos cursos), como indiretamente (influência sobre a vegetação) (LIMA,2015).

O coeficiente de manutenção obtido para a bacia de estudo denota que para manutenção e desenvolvimento de um metro de canal de escoamento na bacia é exigido no mínimo, 1.088,49 m² de área de superfície de contribuição.

O índice de sinuosidade obteve como resultado 1,727. Quanto mais próximo de 1, mais retilíneo é o rio em estudo, enquanto valores superiores a 2,0 sugerem canais tortuosos e os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares,

correspondente ao caso analisado. Como exemplo de comparação, podem ser citados os índices de sinuosidade nas sub-bacias hidrográficas Perdizes (1,33) e Fojo (1,43) no município de Campos do Jordão, SP, Brasil (SANTOS, 2012), os quais indicam que os canais de drenagem destas sub-bacias não têm forma retilínea, mas também, não podem ser considerados como sinuosos, ou seja, os canais têm uma forma transitória.

Em relação a elevação da bacia, baseado no MDT gerado, a altitude variou de 2 a 70 metros, sendo a altitude média de 30,75 metros e declividade média de 9,55 graus. A declividade média de uma bacia hidrográfica é relevante no planejamento, tanto para com o cumprimento da legislação quanto para garantir a eficiência das intervenções do homem no meio e possui importante papel na distribuição da água entre o escoamento superficial e subterrâneo, dentre outros processos. A ausência de cobertura vegetal, classe de solo e intensidade de chuvas, dentre outros, associada à maior declividade, conduzirá à maior velocidade de escoamento, menor quantidade de água armazenada no solo e resultará em enchentes mais pronunciadas, sujeitando a bacia à degradação. Assim, a magnitude dos picos de enchentes ou a menor oportunidade de infiltração e suscetibilidade à erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento superficial, que está fortemente relacionado com o relevo (TONELLO, 2006).

A Tabela 7 a seguir apresenta um resumo com as características geomorfométricas da Bacia do Rio Fragoso.

Tabela 7 – Resumo das características geomorfométricas da Bacia do Rio Fragoso

Área de drenagem (A):	28,57 km ²
Perímetro da bacia (P):	46,28 km
Coeficiente de compacidade (Kc):	2,424
Fator de forma (F):	0,132
Índice de circularidade (IC):	0,168
Densidade de drenagem (Dd):	0,919 km/km ²
Coeficiente de manutenção (Cm):	1.088,49 m ²
Comprimento do canal principal:	14,72 km
Comprimento de todos os canais:	26, 253 km
Sinuosidade (Sin):	1,727
Declividade média da bacia:	9,55 graus

Fonte: A Autora (2021).

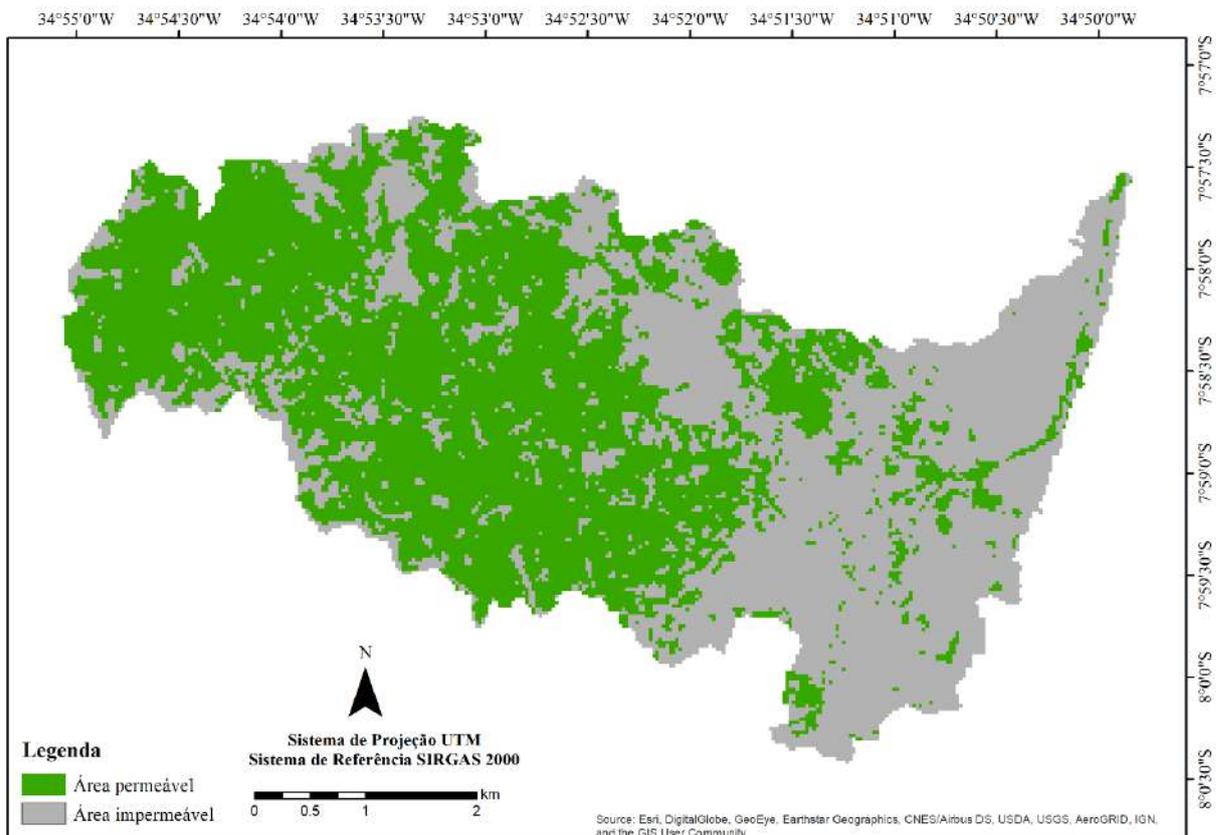
6.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

6.3.1 Definição das Áreas Permeáveis e Impermeáveis

O resultado da taxa de impermeabilização é uma malha com duas cores, uma para área impermeável e outra para área permeável (Figura 41). Depois da classificação realizada, foram realizadas comparações com imagens atuais do Google Earth, confirmando uma boa precisão.

Durante o cadastro das áreas, foi observada uma área densamente urbanizada com pouca presença de áreas permeáveis, visto que o processo de ocupação se encontra fortemente urbanizado. E também, uma outra área com grande presença de áreas permeáveis, e com forte tendência de áreas a serem ocupadas.

Figura 41 – Definição das áreas permeáveis e impermeáveis na Bacia do Rio Frágoso.



Fonte: A Autora (2021).

6.3.2 Modelagem hidrológica com o modelo PCSWMM

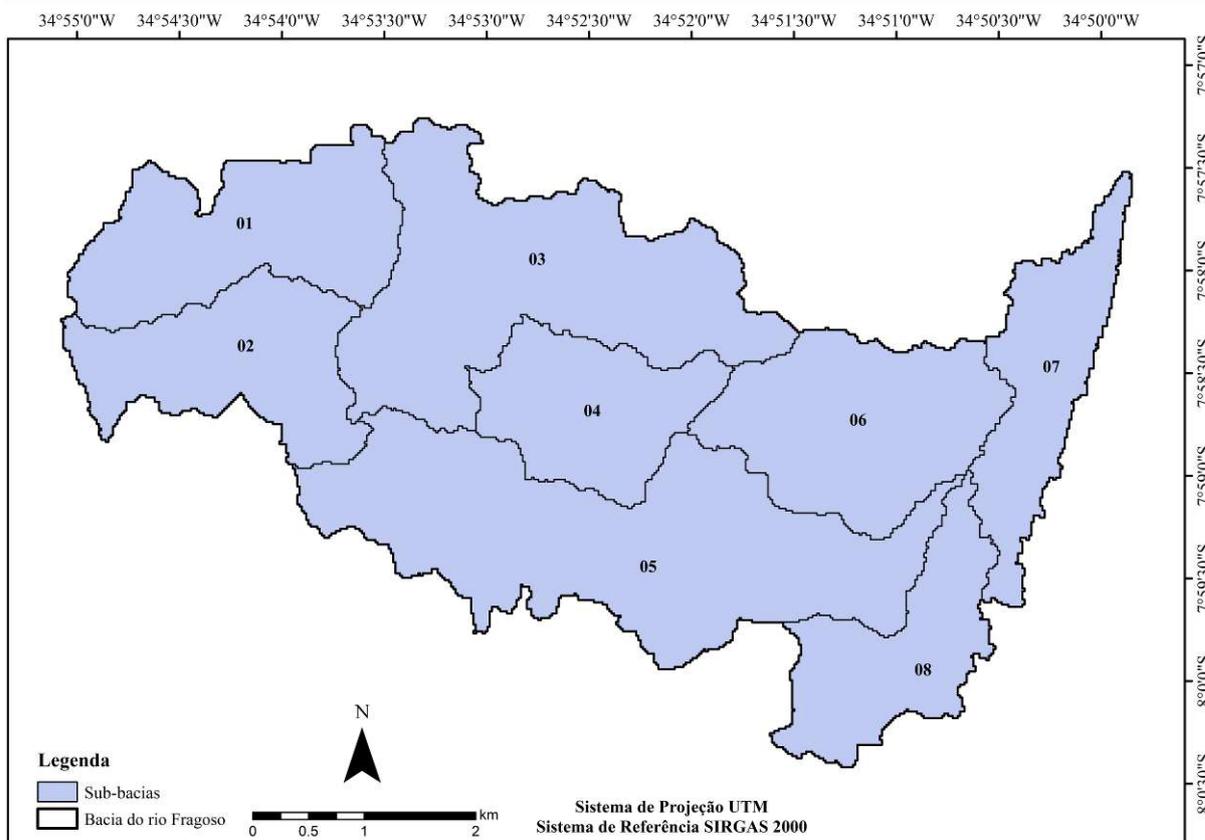
A modelagem hidrológica na Bacia do rio Fragoso foi efetuada em 8 sub-bacias, de acordo com a Figura 42 apresentada a seguir. Os parâmetros de entrada no modelo PCSWMM, obtidos para cada sub-bacia, encontram-se apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados de entrada das sub-bacias do modelo PCSWMM

Sub-bacia	Área (ha)	Largura superficial (m)	Declividade (m/m)	Área impermeável
01	326,440	587,92	0,0049	16,24%
02	274,680	489,63	0,0058	35,49%
03	548,120	619,06	0,0025	42,60%
04	231,080	560,86	0,0047	21,70%
05	679,400	622,08	0,0030	43,00%
06	342,640	750,78	0,0004	74,46%
07	225,200	353,23	0,0003	84,86%
08	230,120	416,56	0,0012	84,56%

Fonte: A Autora (2021).

Figura 42 – Divisão das sub-bacias na bacia do rio Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

Alguns parâmetros como o armazenamento em depressões, que é valor máximo armazenável à superfície por alagamento, encharcamento e interceptação para áreas impermeáveis e permeáveis foram determinadas de acordo com o manual do usuário do programa SWMM. Também foi determinado com auxílio do manual o coeficiente “n” de Manning para o escoamento superficial na parcela da sub-bacia impermeável e permeável e os valores para os condutos (ROSSMAN, 2012). Os valores podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros determinados para dados de entrada no modelo PCSWMM

Armazenamento em depressões (mm)		Coeficiente de rugosidade Manning			
Permeável	Impermeável	Permeável	Impermeável	Canais revestidos	Canais naturais
5,08	2,54	0,15	0,024	0,013	0,040

Fonte: A Autora (2021).

Em relação a infiltração, foi utilizado o modelo da Curva Número. Os CN's obtidos para cada sub-bacia são apresentados na Tabela 10. Foi considerado o tempo de secagem, que é o número de dias que leva um solo totalmente saturado para secar, de 7 dias, como uma referência média padrão para esse estudo. Os valores típicos podem variar entre 2 e 14 dias.

Tabela 10 – Coeficiente Curva-Número (CN) para cada sub-bacia

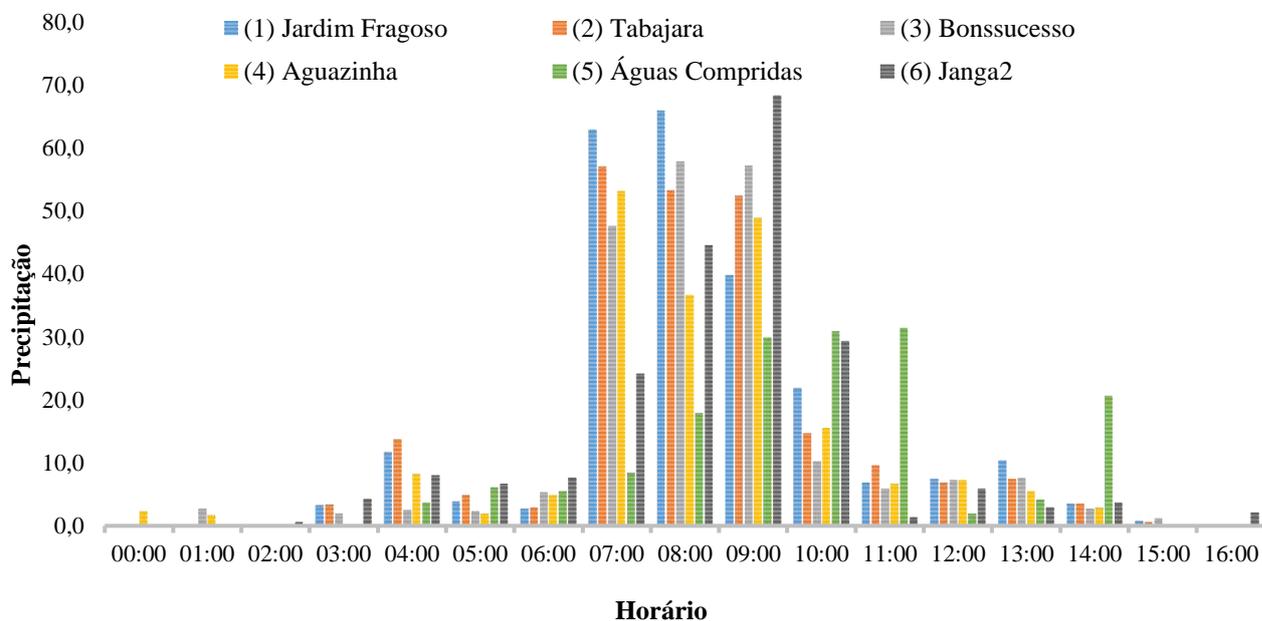
Sub-bacia	CN
1	51
2	65
3	61
4	61
5	70
6	79
7	94
8	94

Fonte: A Autora (2021).

Em relação aos dados pluviométricos foi utilizado o evento extremo de precipitação do dia 30 de maio de 2016, que ocasionou inúmeros problemas para a população da Região Metropolitana do Recife. Foram utilizados dados do Cemaden, onde pode-se perceber que o evento provocou uma chuva acumulada de 241 mm distribuída em 16 horas, como pode ser observado na Figura 43. O período mais intenso da precipitação se concentrou num intervalo de 3 horas, iniciando às 07:00 horas, resultando num total precipitado de 168 mm no posto

pluviométrico Jardim Frágoso. Nesse intervalo mais crítico a maré estava relativamente alta, com altura de 1,69 metros.

Figura 43 – Variabilidade temporal da chuva de 30 de maio de 2016 nos postos da bacia do rio Frágoso

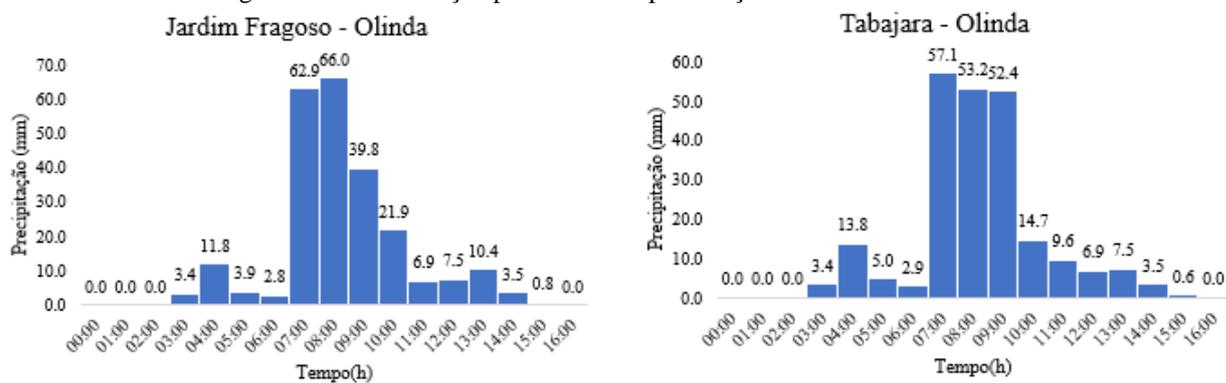


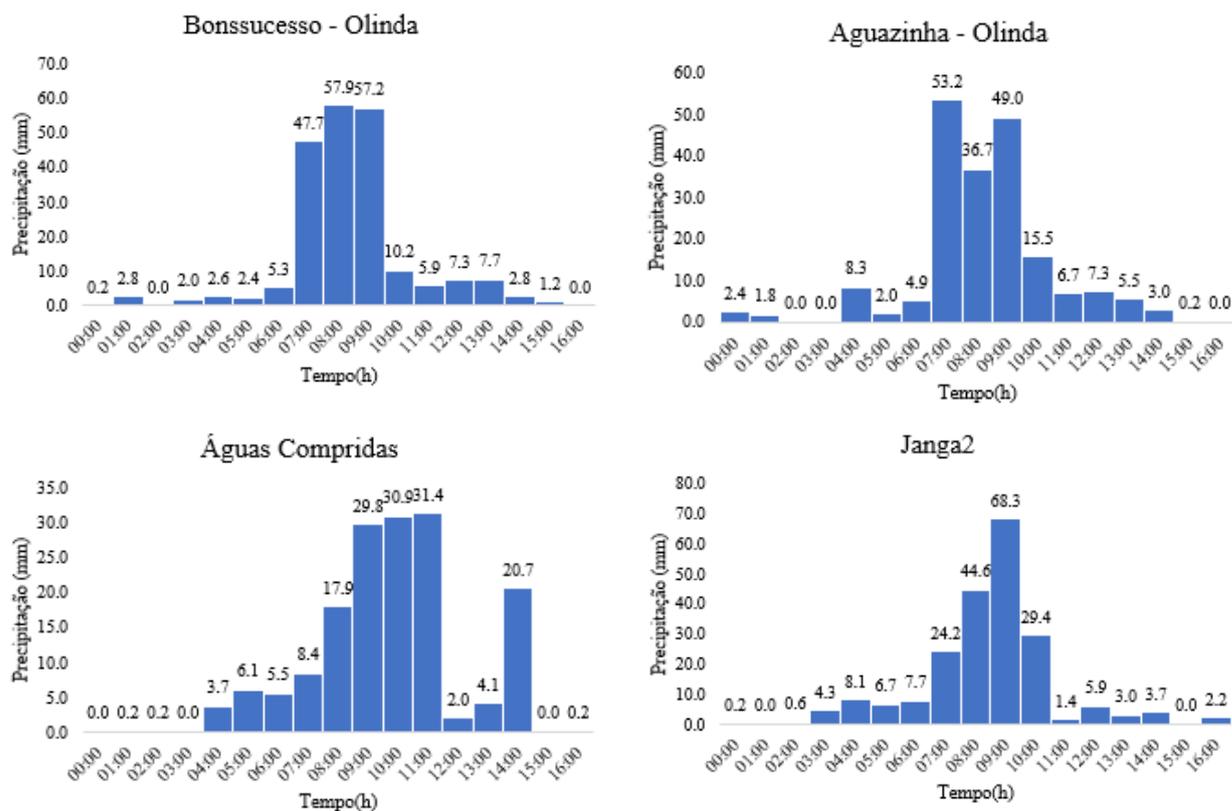
Fonte: A Autora (2021).

*a partir de dados do Cemaden.

A Figura 44 apresenta o comportamento do evento extremo de precipitação considerado com intervalos de uma hora nos registros de dados para todas as estações consideradas.

Figura 44 – Distribuição pluviométrica por estação com intervalos de uma hora.

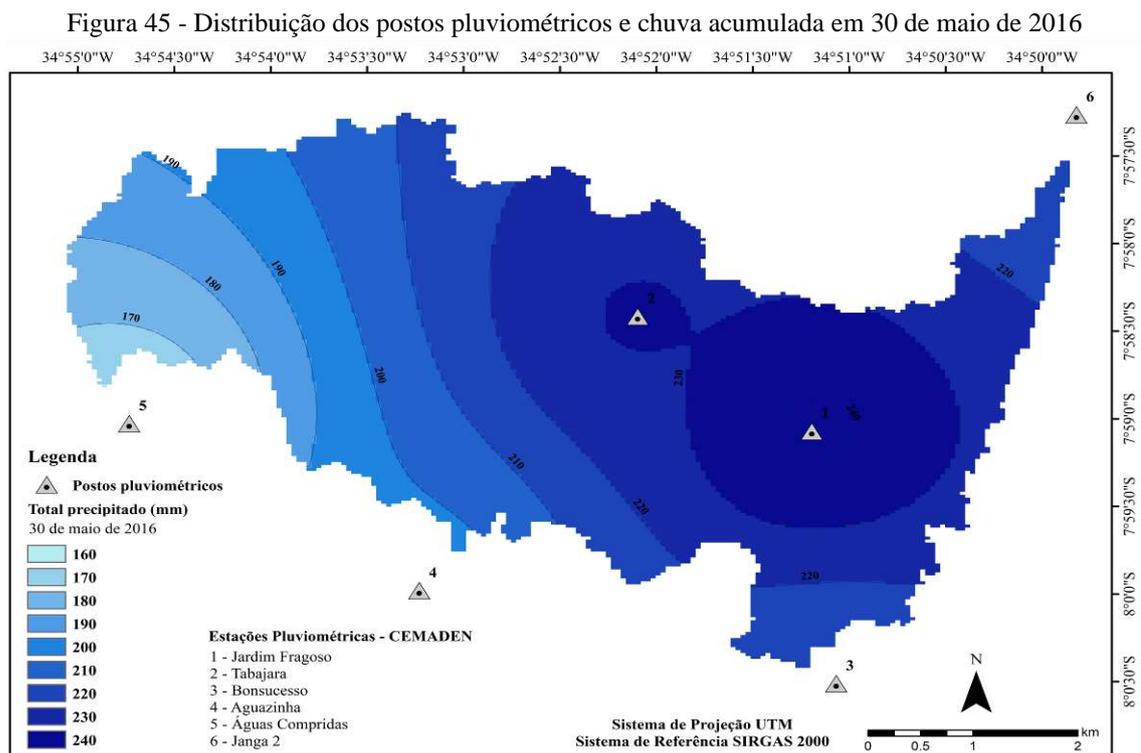




Fonte: A Autora (2021).

*a partir dos dados do Cemaden.

A Figura 45 mostra a distribuição dos postos usados e as isoietas de chuva acumulada na bacia do rio Fragoso, para o evento analisado no período de 16 horas, no dia 30 de maio de 2016. De acordo com a equação IDF do Recife (PDDU,2015), a chuva do evento analisado apresentou tempo de recorrência acima de 100 anos.



Fonte: A Autora (2021).

Com base na equação foi elaborada a curva IDF com uma duração de chuva de 24 horas para os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos. Os resultados de intensidade da chuva e total pluviométrico de chuva são representados nas Tabela 11 e 12 a seguir.

Tabela 11 – Resultado da intensidade da chuva de Recife em mm/h a partir da equação de chuva intensa do Plano Diretor de Drenagem Urbana (2015)

T (min)	t (h)	Resultado da intensidade (mm/h) de chuva				
		T= 2 anos	T= 10 anos	T= 25 anos	T= 50 anos	T= 100 anos
5	0,08	139,50	182,54	212,74	238,87	268,20
10	0,17	112,35	147,02	171,34	192,38	216,00
15	0,25	95,63	125,14	145,84	163,75	183,86
30	0,50	68,99	90,28	105,22	118,14	132,65
60	1,00	47,44	62,08	72,35	81,23	91,21
120	2,00	31,65	41,42	48,27	54,20	60,86
180	3,00	24,77	32,42	37,78	42,42	47,63
360	6,00	16,15	21,14	24,64	27,66	31,06
720	12,00	10,47	13,70	15,97	17,93	20,13
1440	24,00	6,76	8,85	10,32	11,58	13,01

Fonte: A Autora (2021).

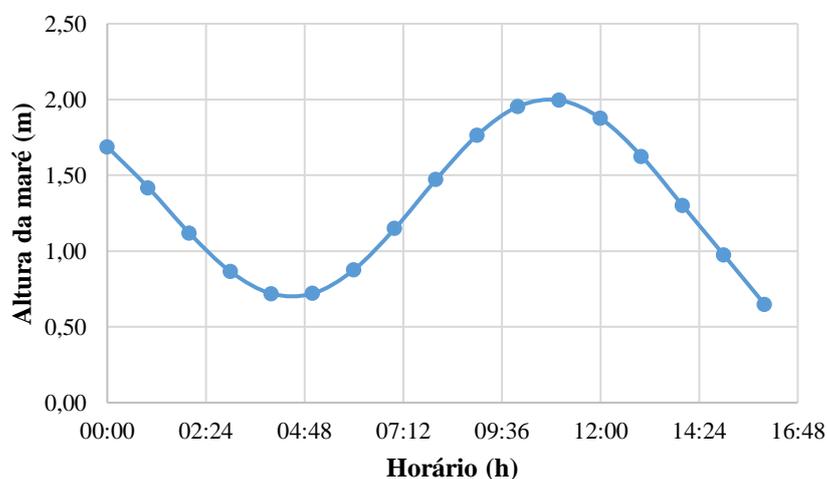
Tabela 12 - Resultado do total pluviométrico de chuva de Recife em mm a partir da equação de chuva intensa do Plano Diretor de Drenagem Urbana (2015)

T (min)	t (h)	Resultado do total pluviométrico (mm) de chuva				
		T= 2 anos	T= 10 anos	T= 25 anos	T= 50 anos	T= 100 anos
5	0,08	11,62	15,21	17,73	19,91	22,35
10	0,17	18,72	24,50	28,56	32,06	36,00
15	0,25	23,91	31,28	36,46	40,94	45,97
30	0,50	34,50	45,14	52,61	59,07	66,33
60	1,00	47,44	62,08	72,35	81,23	91,21
120	2,00	63,31	82,84	96,55	108,41	121,72
180	3,00	74,32	97,25	113,34	127,26	142,89
360	6,00	96,93	126,84	147,83	165,98	186,36
720	12,00	125,65	164,42	191,62	215,15	241,57
1440	24,00	162,36	212,46	247,61	278,02	312,16

Fonte: A Autora (2021).

A maré é um importante dado que precisa ser avaliado em conjunto com os dados pluviométricos no modelo hidrológico e hidrodinâmico, pois influencia no comportamento da inundação. A curva de maré ocorrida no dia do evento analisado está esquematizada na Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Curva de maré para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016.



Fonte: A Autora (2021).

O software PCSWMM apresentou como erros de continuidade os valores apresentados na Tabela 13 para a simulação de calibração e para os diferentes tempos de retorno simulados com duração de 180 minutos (tempo de concentração estimado para a bacia do rio Fragoso pelo método de Kirpich).

Todos os erros obtidos estiveram abaixo do máximo tolerável de 10%, indicando resultados satisfatórios e simulações de boa qualidade.

Tabela 13 – Erros de continuidade para simulações sem alternativas de controle

Tempo de retorno	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
Calibração	-0,03%	-0,48%
2 anos	-0,05%	-0,41%
10 anos	-0,06%	-0,32%
25 anos	-0,06%	-0,28%
50 anos	-0,06%	-0,24%
100 anos	-0,07%	-0,46%

Fonte: A Autora (2021).

6.3.3 Modelagem Hidrodinâmica – Calibração

A modelagem hidrodinâmica bidimensional e a visualização dos resultados foram feitas através do software HEC-RAS 5.0.6, tendo por base os dados previamente gerados pelo modelo hidrológico PCSWMM. Foi definido o Sistema Internacional de medidas (SI) em metros para todos os arquivos importados, de modo a permitir a visualização do modelo esquemático representando a macrodrenagem do rio Fragoso e os demais elementos em projeção UTM e Datum-SIRGAS 2000, assim como para computar os dados de vazão em m³/s.

Para calibração, com o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016, como dados de entrada, foram utilizados os hidrogramas gerados pelo PCSWMM nas sub-bacias, com vazões máximas apresentadas na Tabela 14 a seguir. Para saída do sistema, foi considerado a saída no encontro com o rio Paratibe.

Tabela 14 – Vazões máximas por sub-bacia para o evento em 30 de maio de 2016.

Sub-bacia	Vazão máxima (m³/s)
1	12,59
2	17,41
3	56,31
4	24,30
5	62,77
6	54,78
7	35,41
8	33,19

Fonte: A Autora (2021).

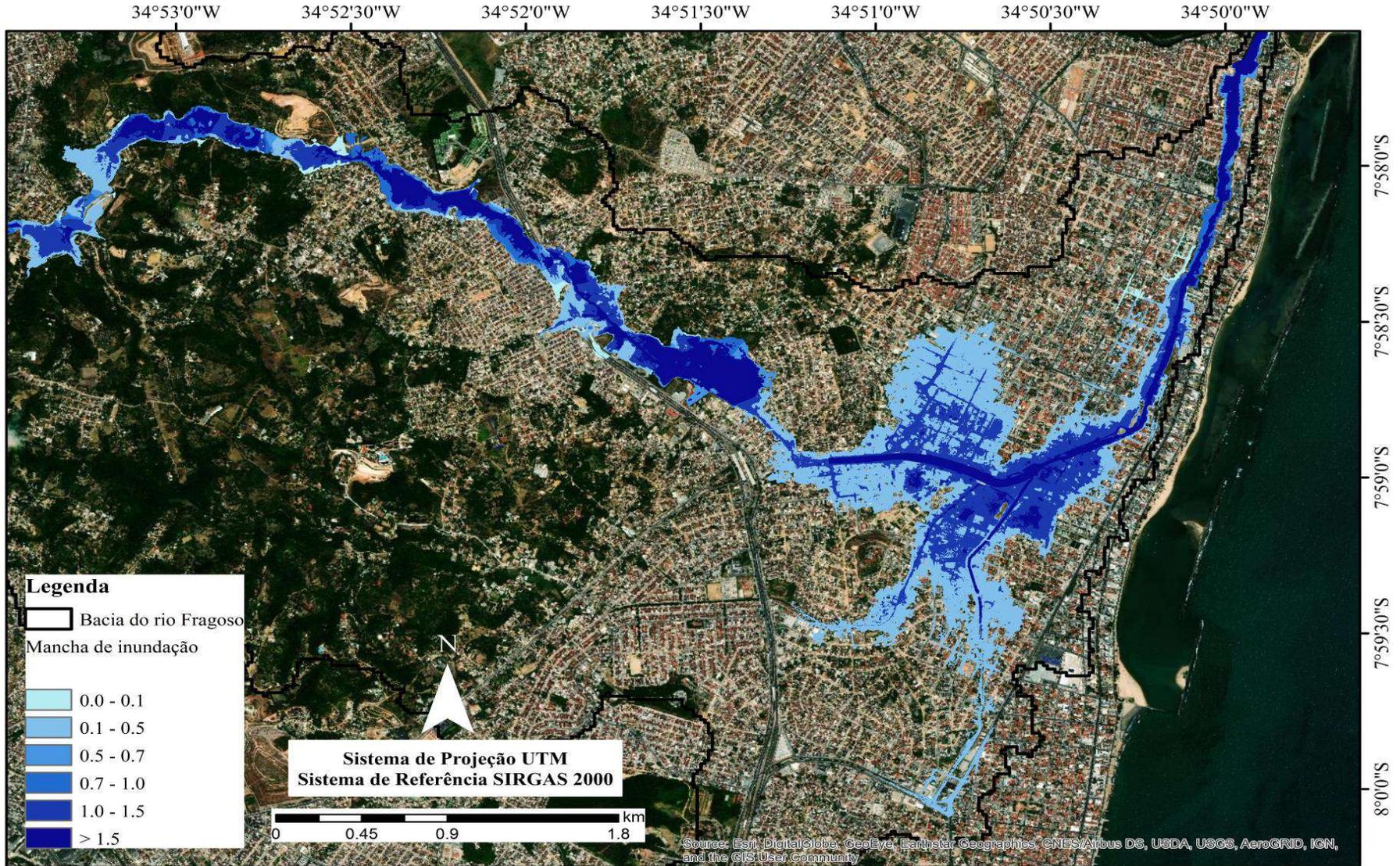
Em busca da consideração do cenário mais próximo da realidade, foi realizada a espacialização dos coeficientes de rugosidade de Manning calibrados, com resultados apresentados na Tabela 15 e Figura 47 a seguir.

Tabela 15 – Coeficientes de rugosidade calibrados

Classe de uso e ocupação	Coefficiente de rugosidade (n) calibrado
Área urbana	0,01
Pastagem	0,03
Agricultura	0,04
Floresta	0,8
Rio canalizado	0,016
Rio natural	0,035

Fonte: A Autora (2021).

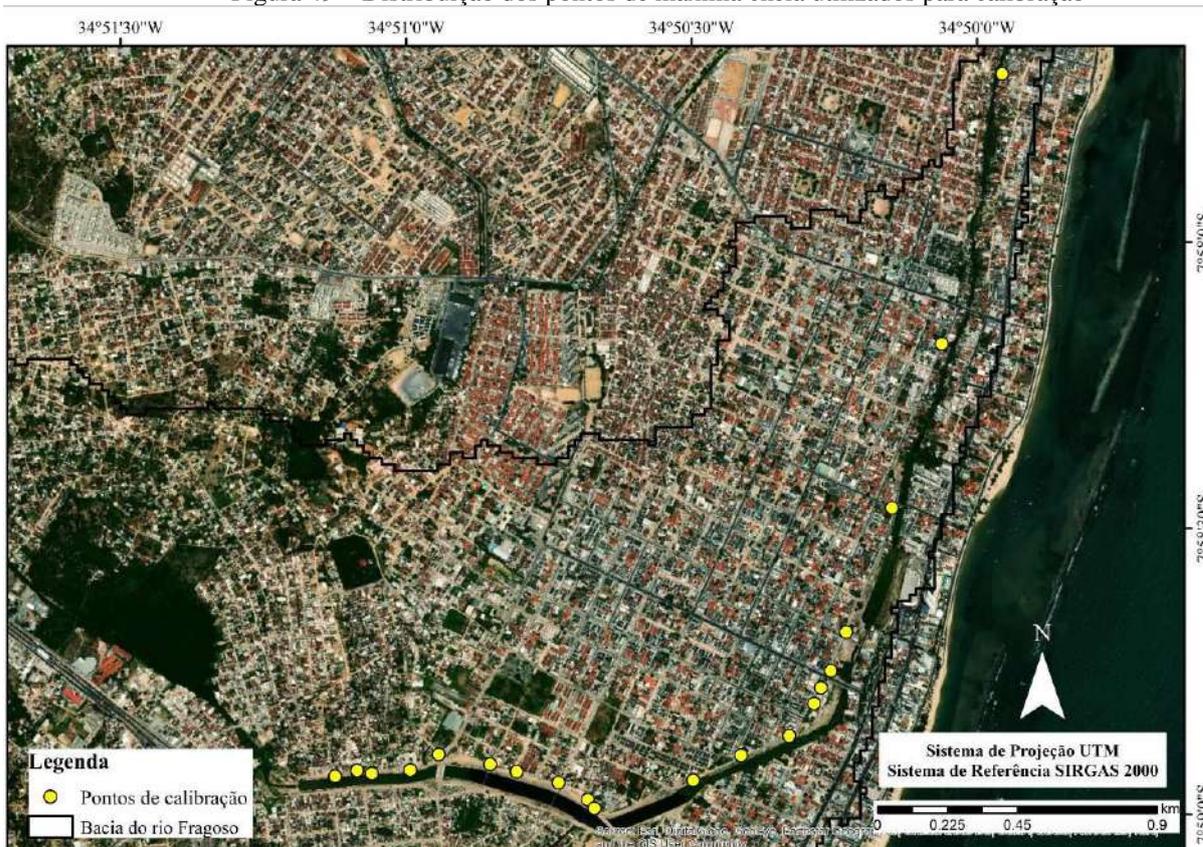
Figura 48 – Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016



Fonte: A Autora (2021).

Esse evento analisado foi utilizado para realizar a calibração do modelo hidrodinâmico, como mencionado anteriormente. Os dados observados foram medidos por uma equipe técnica de topógrafos, que realizaram o mapeamento e levantamento das coordenadas geográficas de 20 pontos limitantes da água em região crítica da área de estudo, podendo ser observado na Figura 49 . Tal levantamento serviu de referência para a obtenção das cotas máximas alcançadas pela inundação.

Figura 49 – Distribuição dos pontos de máxima cheia utilizados para calibração



Fonte: A Autora (2021).

Foram então comparadas as profundidades máximas de inundação (simuladas e observadas). Segundo Batista (2015), o grau de precisão dos resultados de um modelo está associado a diferentes fatores, de modo particular e/ou em conjunto. As próprias incertezas envolvidas nas várias etapas da modelagem acabam por limitar a acurácia dos resultados, como no caso de vários parâmetros do modelo hidrológico cujos valores são estimados através das propriedades físicas. Os valores dos coeficientes estatísticos obtidos para a calibração da bacia do Rio Fragoso estão apresentados na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Coeficientes estatísticos de calibração para a bacia do Rio Fragoso

Coeficientes Estatísticos	Valores obtidos com a calibração para o dia 30/05/2016
NSE	0.685
R ²	0.777
PBIAS	6.110
RSR	0.562

Fonte: A Autora (2021).

O coeficiente estatístico NSE apresentou bom desempenho, estando situado entre os limites de 0,65 a 0,75; R² apresentou ótimo desempenho por estar enquadrado entre os limites 0,7 a 1,0. Para o coeficiente estatístico PBIAS, o desempenho foi ótimo, visto que o valor obtido pela análise das simulações é menor que 10 e para o RSR apresentou bom desempenho, enquadrado entre os limiars de 0,5 a 0,6. De forma geral, observa-se que os resultados estatísticos se apresentaram de forma satisfatória de acordo com os valores recomendados pela literatura e descritos anteriormente no item 5.5 – Calibração do modelo.

Como referência a outros trabalhos, tem-se Silva (2019) que utilizou os indicadores de desempenho NSE, R², PBIAS, RSR para analisar os intervalos estudados na sub-bacia do Rio Ipojuca - Caruaru em Pernambuco. Shawul et. al (2019) também utilizaram os indicadores R², NSE, PBIAS e RSR para avaliar suas simulações na bacia do Alto Awash na Etiópia. Batista (2015) fez uso dos coeficientes estatísticos R², NSE e PBIAS para avaliar o desempenho da modelagem para bacia do rio Pirapama no município do Cabo de Santo Agostinho em Pernambuco.

6.3.4 Validação

Após a calibração com o evento de 30 de maio de 2016, foi realizada a validação qualitativa do modelo com a precipitação intensa ocorrida em 24 de julho de 2019, para posteriormente realizar as previsões.

Foi realizada uma visita no local para identificação de alguns pontos de alagamento e então verificado no modelo, assim como o levantamento a partir de algumas reportagens, identificando alguns pontos como a Rua Caetano Ribeiro, o Conjunto Residencial Jardim Olinda e trechos da PE-15. Em geral, os bairros mais afetados foram Jardim Atlântico, Jardim Fragoso e Casa Caiada. Também foi utilizado imagens aéreas de drones, cedidas por uma

empresa de fotografias e filmagens, para mapear as inundações do estudo, realizando a comparação com o modelo, como pode ser observado nas Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

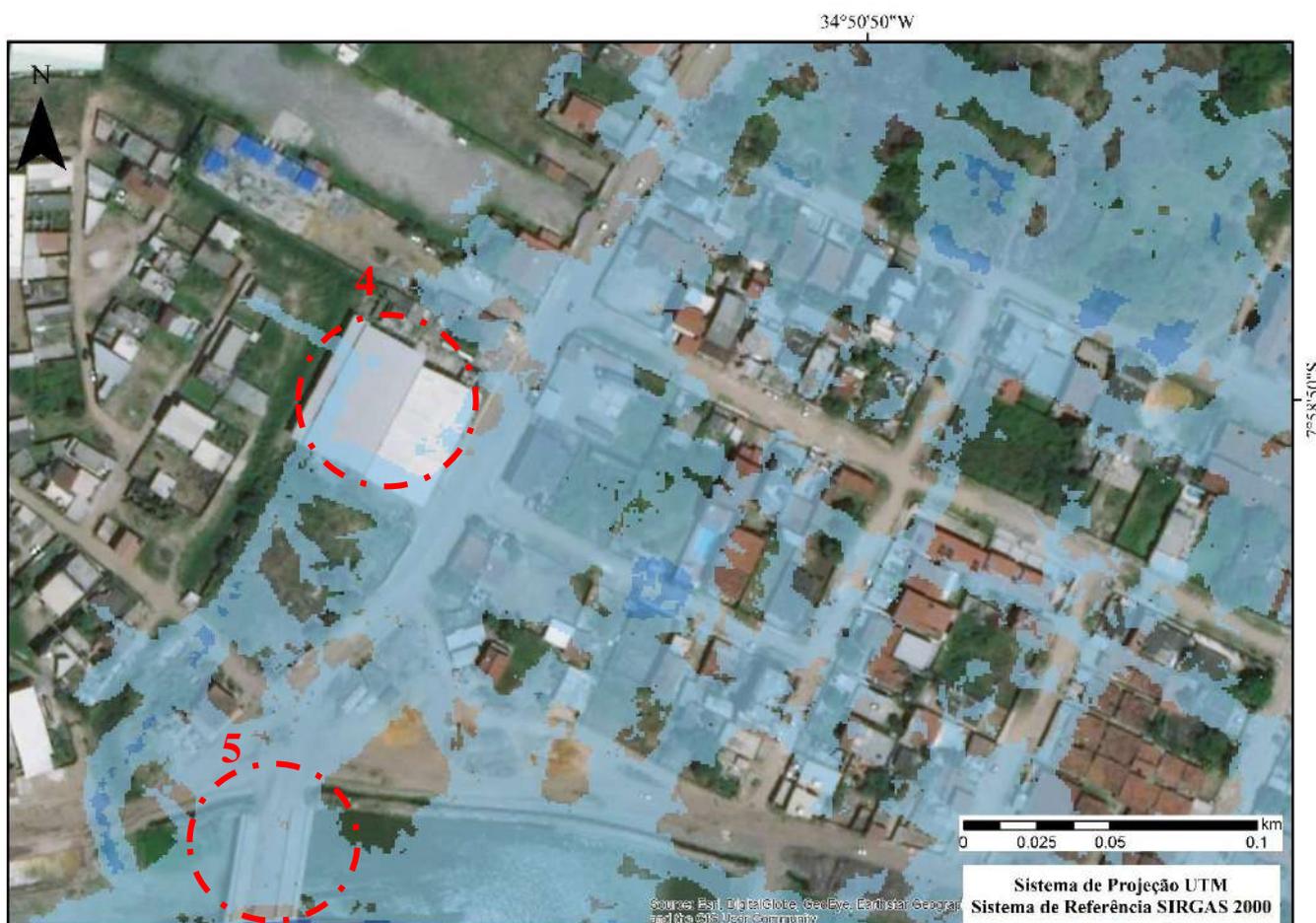
Dessa forma, o modelo apresentou-se de forma satisfatória e coerente com a realidade, sendo então utilizado para os cenários apresentados a seguir. Com as Figura 53 e Figura 54 pode-se observar as manchas de inundação para os tempos de retorno de 2 anos e 100 anos, nesse primeiro cenário analisado. No Apêndice A, pode-se observar as manchas de inundação para os tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos.

Figura 50 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 1



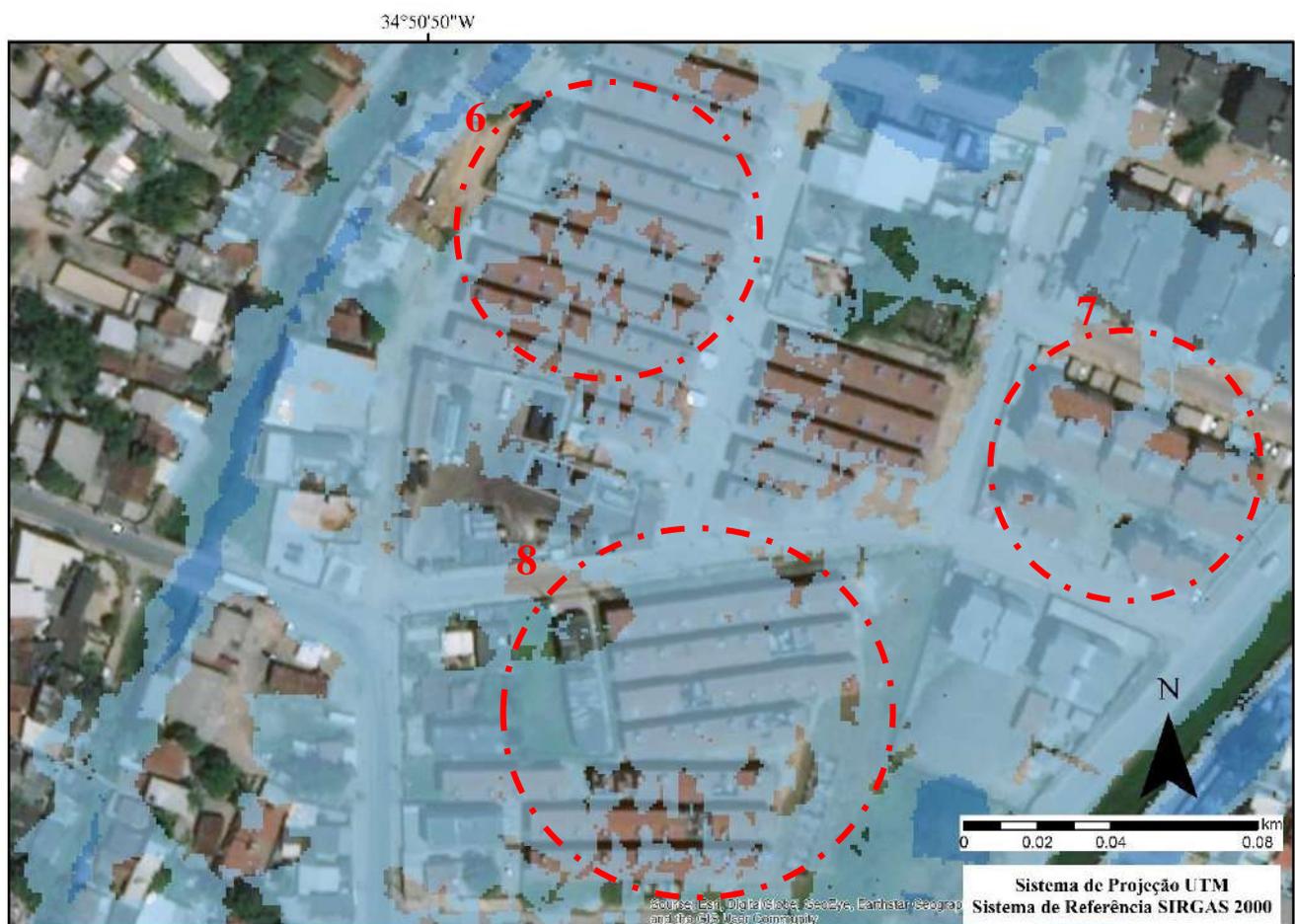
Fonte: A Autora (2021).

Figura 51 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 2



Fonte: A Autora (2021).

Figura 52 – Validação do modelo comparativa com imagens aéreas do evento ocorrido em 24 de julho de 2019 – Parte 3



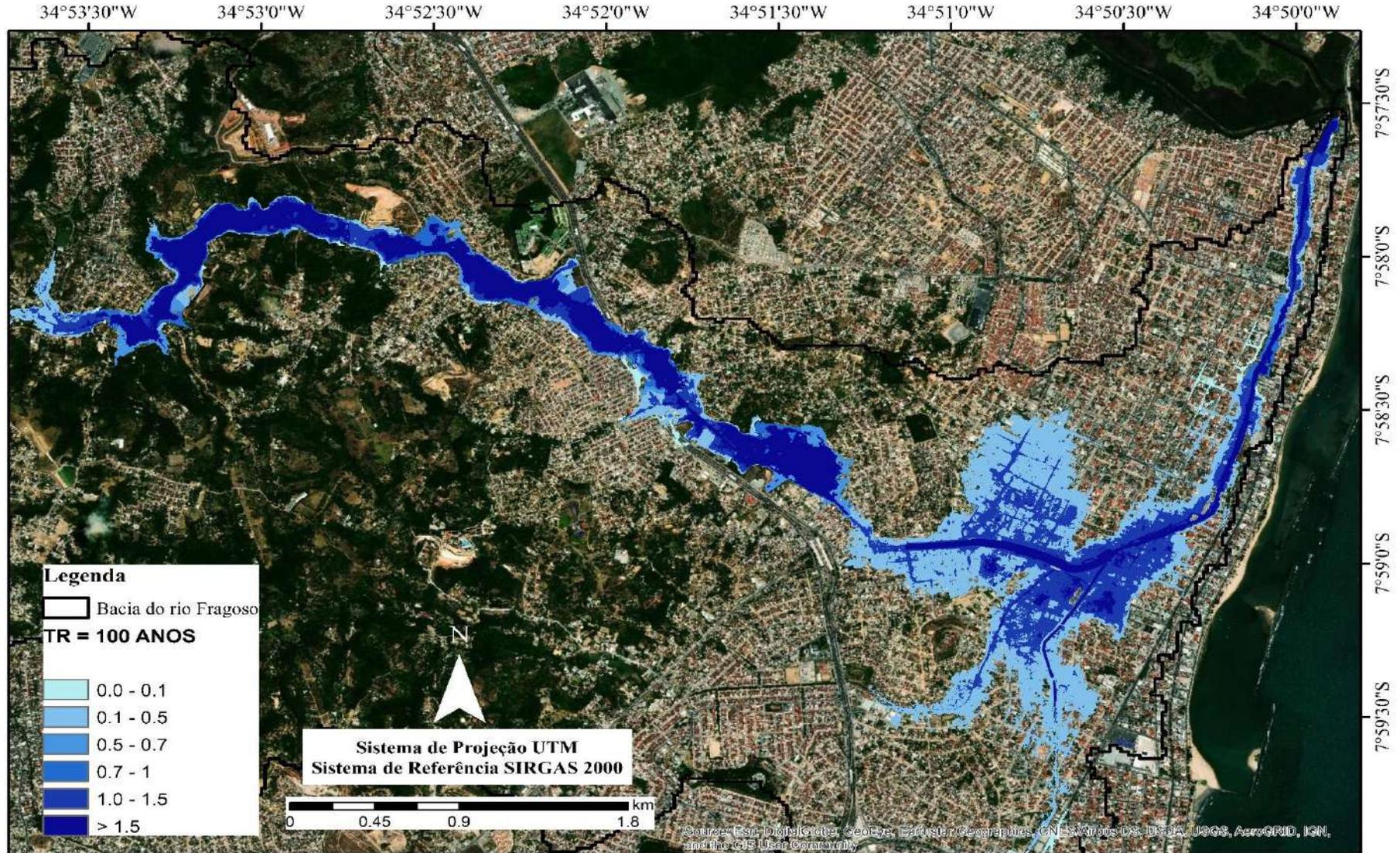
Fonte: A Autora (2021).

Figura 53 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 2 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

Figura 54 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 100 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso



Fonte: A Autora (2021).

6.3.5 Cenário 2: Construção do canal do Fragoso

A região da cidade baixa de Olinda, onde está localizado o rio Fragoso, vem sofrendo com inundações em períodos chuvosos há vários anos. Como outro exemplo, temos o dia 09 de maio de 2016, onde foi registrado um evento de precipitação intensa, com uma chuva acumulada de 239 mm em 22 horas. Outros eventos como ocorridos em 6 de fevereiro de 2019, 13 de junho de 2019, 23 de maio de 2020, 14 de junho de 2016 causaram muitos problemas de alagamento e transbordamento do canal do Fragoso.

O problema é provocado, principalmente, pela ocupação urbana desordenada que produziu duas situações de vulnerabilidade:

- muitas residências foram construídas em locais de cota muito baixa que frequentemente são alagadas
- a urbanização invadiu o leito maior do rio Fragoso (planície de inundação) e resultou no estrangulamento da calha expandida do rio, culminando com a diminuição da sua capacidade de escoamento nos invernos mais chuvosos.

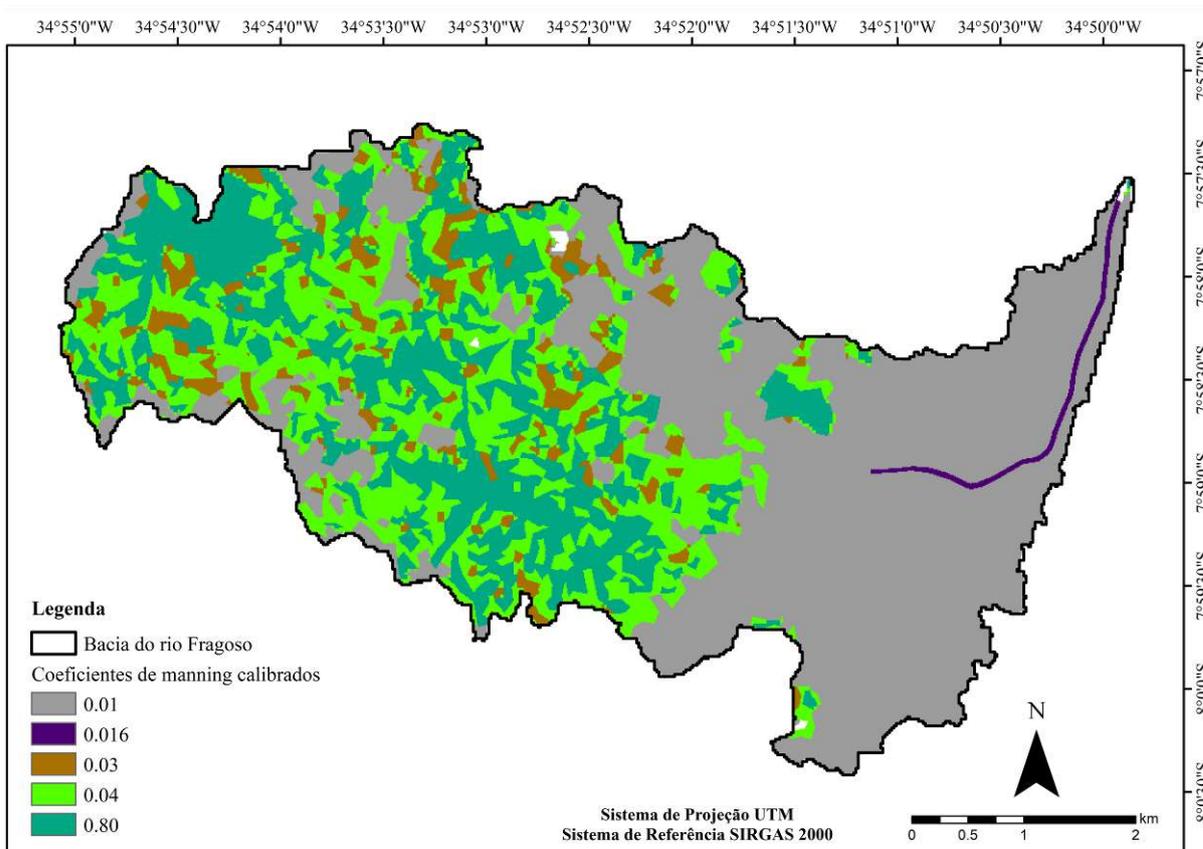
Atualmente, o município passa por uma ampliação do seu sistema viário com a melhoria das condições de tráfego em busca de melhor mobilidade na Via Metropolitana Norte, que prevê a integração entre a PE-15 (Olinda) e a PE-01 (Paulista). O projeto, promovido por parceria dos Governos Estadual e Federal e prevê, ainda, a canalização de parte do rio Fragoso.

As obras do canal do Fragoso foram licitadas em 2012 e tiveram início em setembro de 2013, sob a responsabilidade da Companhia Pernambucana de Habitação e Obras (CEHAB), Secretaria das Cidades e Prefeitura Municipal de Olinda. Atualmente a maior parte das obras é administrada pela CEHAB. O Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE-PE) vem atuando no projeto desde janeiro de 2014 para acompanhar a execução do contrato que prevê o revestimento do Canal do Fragoso – 2ª Etapa e Construção de oito Obras de Arte.

Diante desse contexto, foi realizada a simulação hidrodinâmica para o cenário futuro com a obra do canal finalizada, realizando o mapeamento das áreas inundáveis para tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Foi considerado seção retangular constante de 45 metros de largura. O modelo também foi adaptado em relação ao coeficiente de Manning para modificar a espacialização do rio natural para o rio canalizado, como pode ser visto na Figura 55.

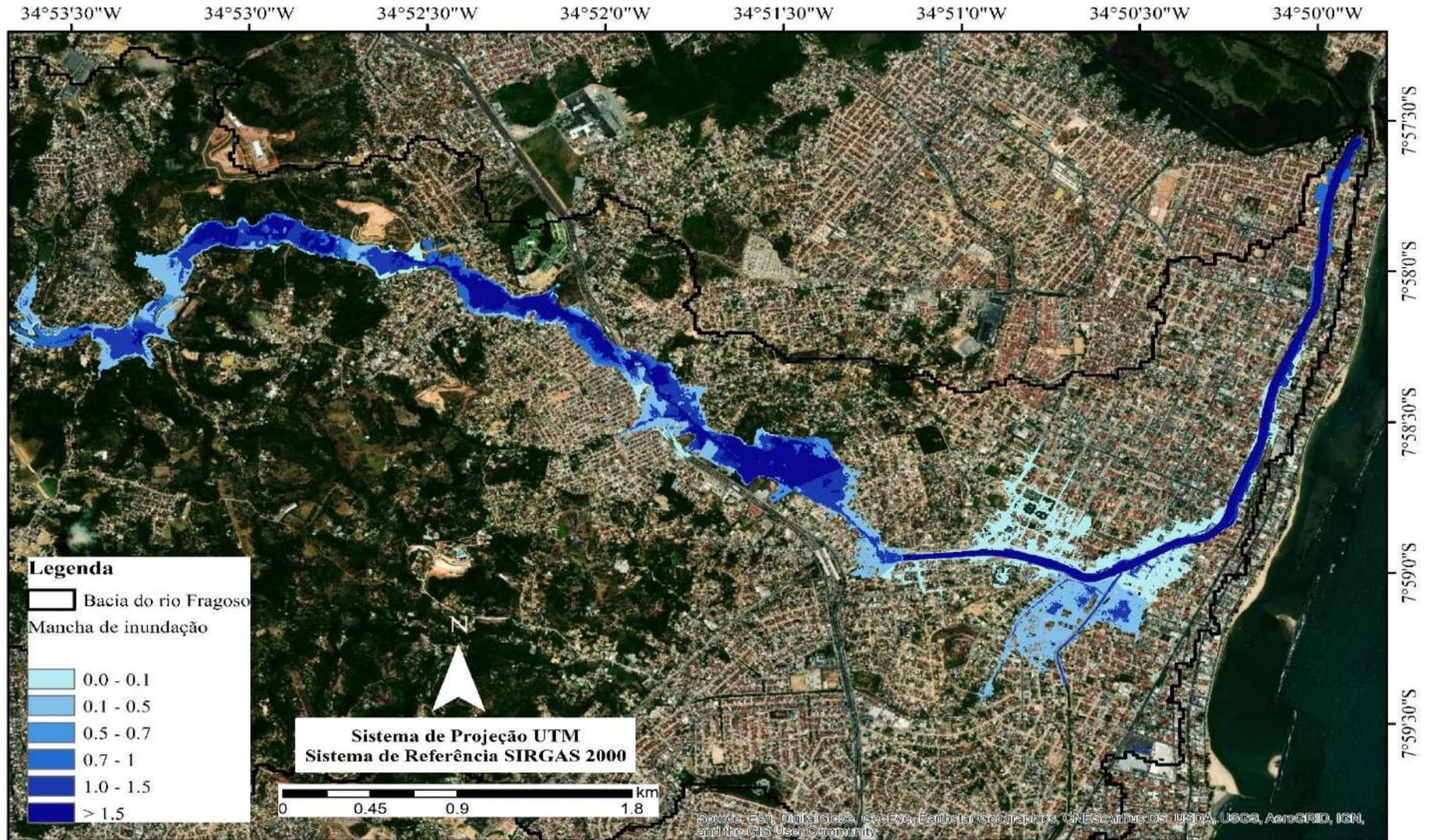
Figura 55 – Coeficiente de Manning espacializado para o rio Fragoso canalizado



Fonte: A Autora (2021).

A Figura 56 apresenta a mancha de inundação com simulação do evento de precipitação ocorrido em 30 de maio, caso a obra do canal do Fragoso já estivesse finalizada. A Figura 57 e Figura 58 a seguir, apresentam os mapas de inundação referentes as simulações realizadas com os coeficientes de rugosidade calibrados para o tempo de retorno de 2 e 100 anos, respectivamente. Para os tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos, os resultados são apresentados no Apêndice B.

Figura 56 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016 considerando a obra do canal finalizada



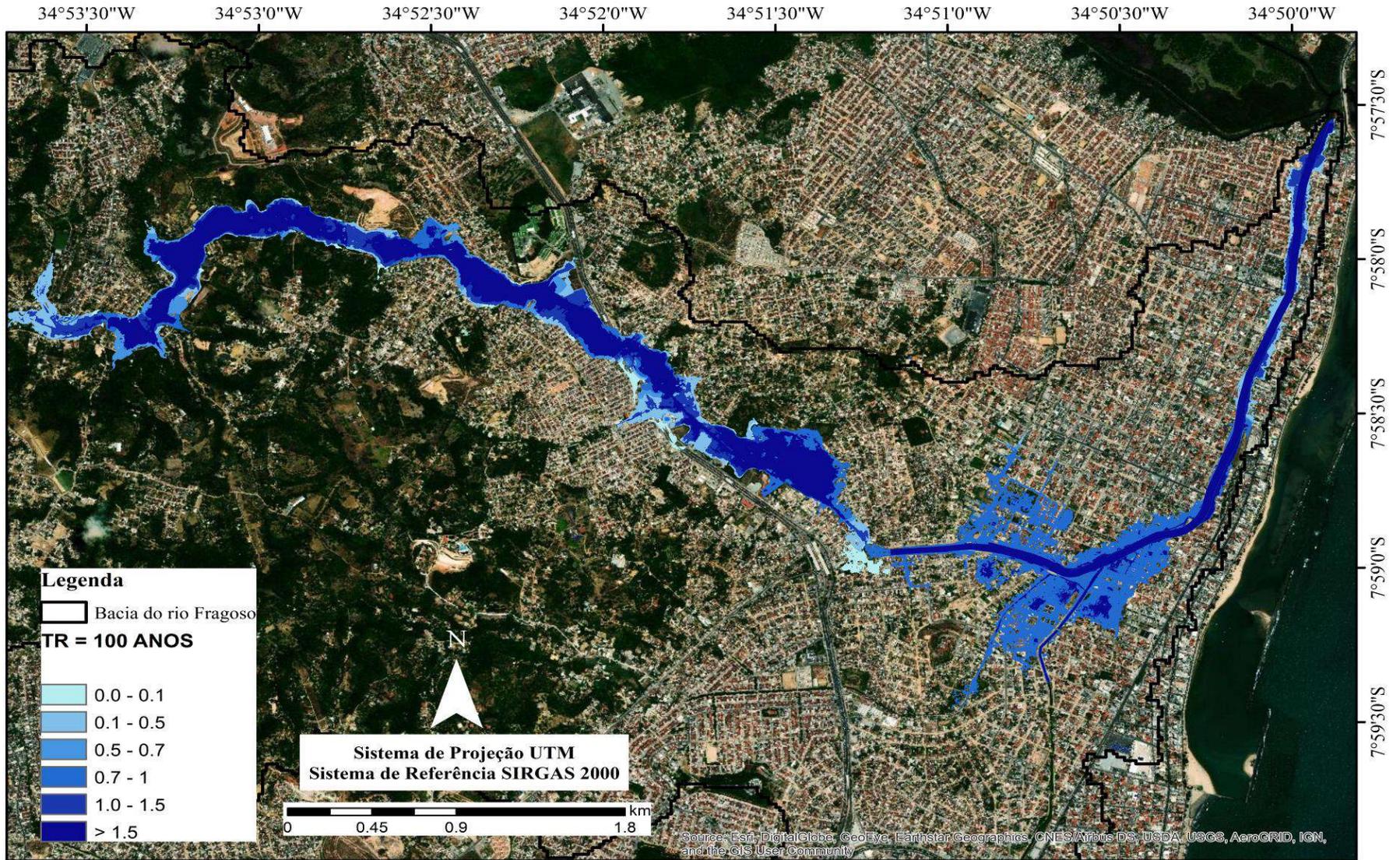
Fonte: A Autora (2021).

Figura 57 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 2 anos considerando a obra do canal finalizada



Fonte: A Autora (2021).

Figura 58 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 100 anos considerando a obra do canal finalizada



Fonte: A Autora (2021).

Em termos de uma análise comparativa da área total alagada e altura máxima atingida na calha principal do Rio Frágoso, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17 – Comparação entre as áreas alagadas e alturas máximas atingidas, considerando a obra do canal do Frágoso concluída

	Tempo de retorno (Tr)				
	2 anos	10 anos	25 anos	50 anos	100 anos
Área máxima alagada	1,65 km ²	1,73km ²	1,87km ²	1,93km ²	2,00km ²
Altura máxima atingida na calha principal (dentro do rio Frágoso)	4,40m	4,60m	4,76m	4,90m	5,05m

Fonte: A Autora (2021).

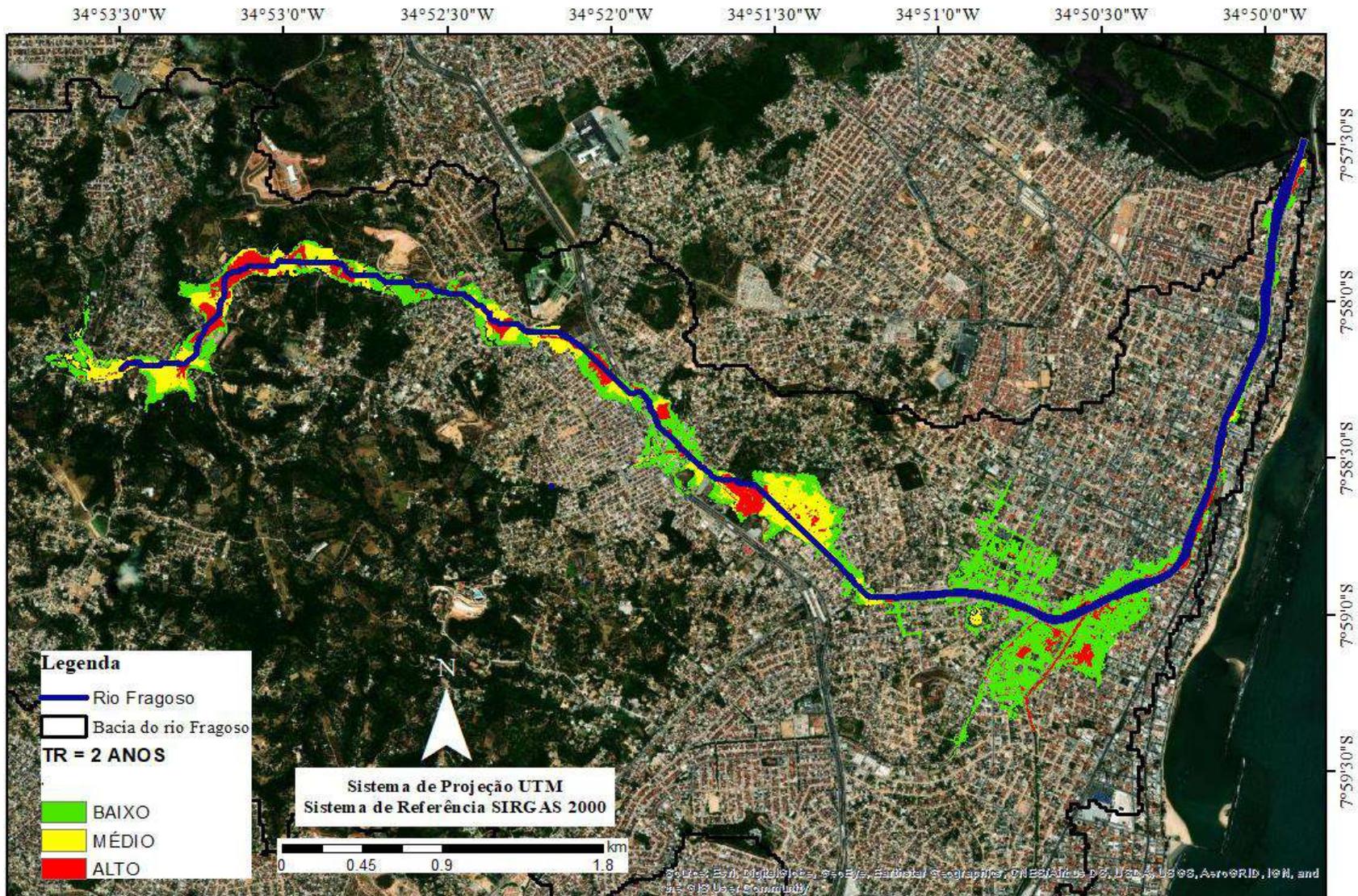
Com esse estudo, percebe-se que mesmo após a finalização das obras do canal, os problemas de inundação persistirão. As simulações realizadas consideram o livre escoamento das águas no canal, porém em situações reais, encontra-se presente no canal, problemas como assoreamento, presença de lixo, podendo distorcer os resultados, aumentando as áreas de inundação e as alturas atingidas.

Foi utilizado o indicador de perigo profundidade, gerando os mapas de indicadores de perigo para o tempo de retorno de 2 e 100 anos como pode ser visto nas Figura 59 e Figura 60.

Segundo Wright (2008), inundações com profundidade da água mais de 0,60 metros resultam em perigo definitivo para as pessoas, sendo assim utilizado para definir três níveis de severidade da inundação para a bacia do rio Frágoso, sendo classificada a profundidade da água em baixa (0-0,60 m), média (0,60-1,2 m) e alta (> 1,2 m). Os resultados do mapeamento dos indicadores de perigo ajudaram a identificar na planície de inundação do rio Frágoso as áreas com maior dano potencial à população.

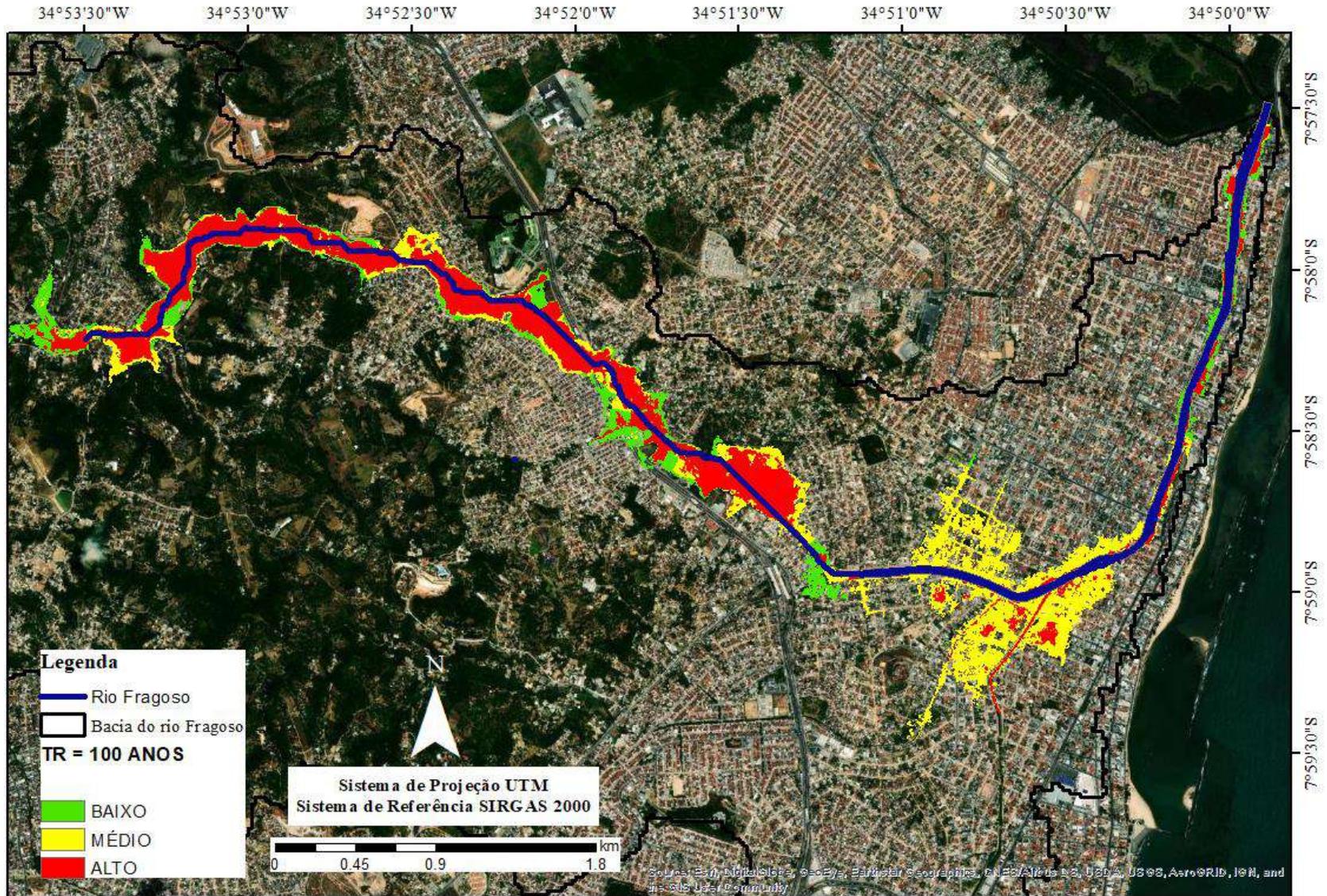
Para efeito de comparação, podem ser analisados o mapa do indicador de perigo em relação a profundidade para o município de Ipojuca, em Pernambuco (RIBEIRO NETO, 2016), o mapeamento das áreas de perigo de inundações na bacia do Braço do Baú, localizada no município de Ilhota, Santa Catarina, Brasil (MONTEIRO & KOBİYAMA, 2013) e os índices de risco em Dacca, capital do Bangladesh (MASOOD & TAKEUCHI, 2012 e GAIN et al.,2015).

Figura 59 – Mapa do indicador de perigo como resultado de inundações para o período de retorno de 2 anos considerando a obra do canal finalizada



Fonte: A Autora (2021).

Figura 60 - Mapa do indicador de perigo como resultado de inundações para o período de retorno de 100 anos considerando a obra do canal finalizada



Fonte: A Autora (2021).

6.3.6 Cenário 3: Reservatórios de retenção em lote

A simulação de cenários com aplicação de práticas de desenvolvimento de baixo impacto visa analisar os benefícios que possam causar na bacia do Rio Frágoso. Foram avaliadas as reduções do pico de vazão e redução do volume total de escoamento.

A técnica LID escolhida para simulação, foi a aplicação de reservatórios de retenção em lotes, com auxílio do software PCSWMM. Essa técnica tem como finalidade armazenar a água da chuva por um determinado período, devolvendo-a ao sistema de microdrenagem após este tempo ou ao longo deste período a partir de uma vazão de controle, diminuindo dessa forma os picos de vazão, diminuindo os problemas de inundação localizadas. A armazenagem da água em lotes pode ainda proporcionar seu uso doméstico em atividades que não requerem muita exigência nos padrões de qualidade, como regar plantas, abastecimento de caixas de descargas, entre outras. Outras vantagens dessa técnica podem ser: custos reduzidos, se comparados a um grande número de controles distribuídos, custo menor de operação e manutenção.

Como dados de entrada, são necessários a altura do reservatório e parâmetros reguladores de fluxo que são apresentados na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 – Parâmetros para simulação dos reservatórios de retenção em lotes

Parâmetros	Valor
Parâmetros dos reservatórios	
Capacidade (m ³)	5,0
Altura (m)	1,6
Diâmetro da superfície (m)	2,0
Parâmetros reguladores de fluxo	
Tipo	Orifício circular
Distância do fundo (mm)	6
Diâmetro (cm)	3,2
Coefficiente de fluxo (mm/h)	0
Tempo de retardo	0

Fonte: A Autora (2021).

O reservatório padrão escolhido possui um volume de 5 m³, de forma que a área de ocupação pudesse ser aplicada nas residências. Porém, esse volume de armazenamento pode ser maior, contribuindo ainda mais para retenção nos lotes. Esse volume de armazenamento foi determinado de acordo com o método da simulação apresentado no item 5.3.10. Para validar esse volume de reservatório, foi realizado uma análise no *software* Netuno,

desenvolvido pelo Laboratório de Eficiências Energéticas, da Universidade Federal de Santa Catarina, em 2004.

A metodologia utilizada pelo *software* Netuno consiste em calcular o volume de água pluvial que escoar pela superfície de captação diariamente (V_{ap}). Posteriormente, o volume de água pluvial consumido diariamente (V_c), que é o mínimo da demanda diária per capita de água pluvial e o volume de água pluvial disponível no reservatório para suprir a demanda. E o volume de água disponível no reservatório (V_R) após suprir totalmente ou parcialmente a demanda.

Os dados de entrada necessários foram: dados pluviométricos locais, consumo de água total por pessoa, população, percentual de água para fins não potáveis (que se deseja substituir), área de captação da edificação e coeficiente de escoamento superficial.

Os índices pluviométricos foram obtidos por meio de séries históricas da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), de forma a possibilitar o conhecimento da média de volume de água de chuva e as particularidades de épocas secas e chuvosas. Foram obtidos os dados para Olinda a partir de 1999 até o ano de 2018. Os dados incluem informações sobre precipitações diárias com um intervalo de anos considerável para análise. O consumo médio per capita de água foi estimado em 170 litros/ hab.dia e a média de moradores em domicílios de 4,0 habitantes.

Foi realizada uma análise amostral dos lotes com auxílio do Google Earth, visto que a região estudada não possui cadastro com tais informações. Dessa forma, foi considerado um lote padrão de 200 m², apresentando 70% de área impermeável e 30% de área permeável, representado na

Figura 61 a seguir e com visualização 3D na Figura 62, para melhor representação da área disponível.

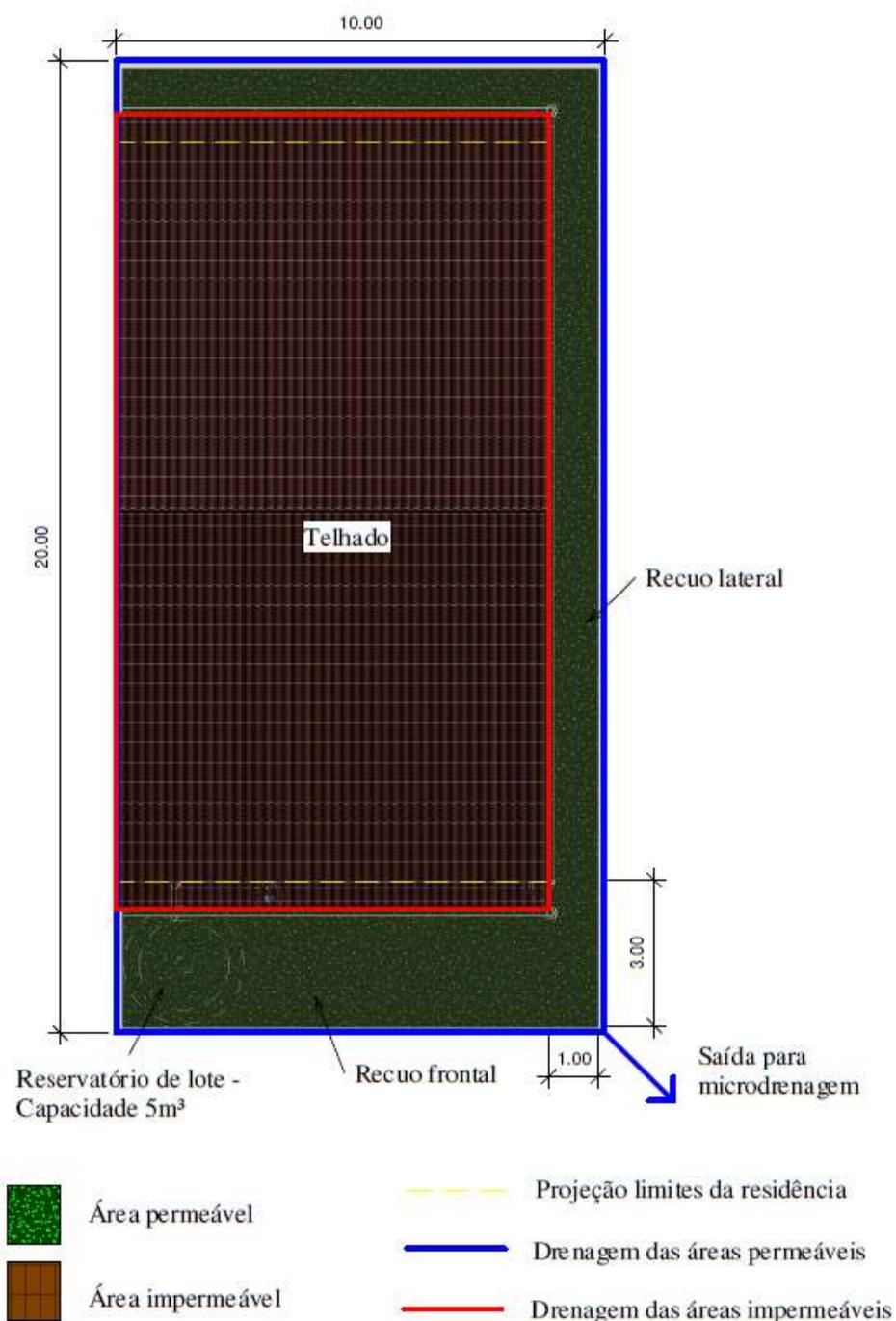
Para a área de captação, foi realizada a soma das áreas das superfícies que, interceptando chuva, conduzem as águas para determinado ponto da instalação representada pela projeção horizontal da cobertura da edificação, seguindo a recomendação da NBR 10844 (ABNT, 1989), obtendo-se 140 m² de área de captação.

O coeficiente de escoamento superficial representa a relação entre o volume total escoado e o volume total precipitado variando conforme a superfície. Com base nos valores comuns adotado, foi utilizado o C igual a 0,9, considerando o material do telhado de telhas cerâmicas (TOMAZ, 2007).

Para o percentual de demanda de água, foi utilizado os dados recomendados por Clarke e King (2005), considerando 55% de uso para descarga em vaso sanitário, lavagem de roupa e limpeza, apesar das necessidades de alterações nas instalações.

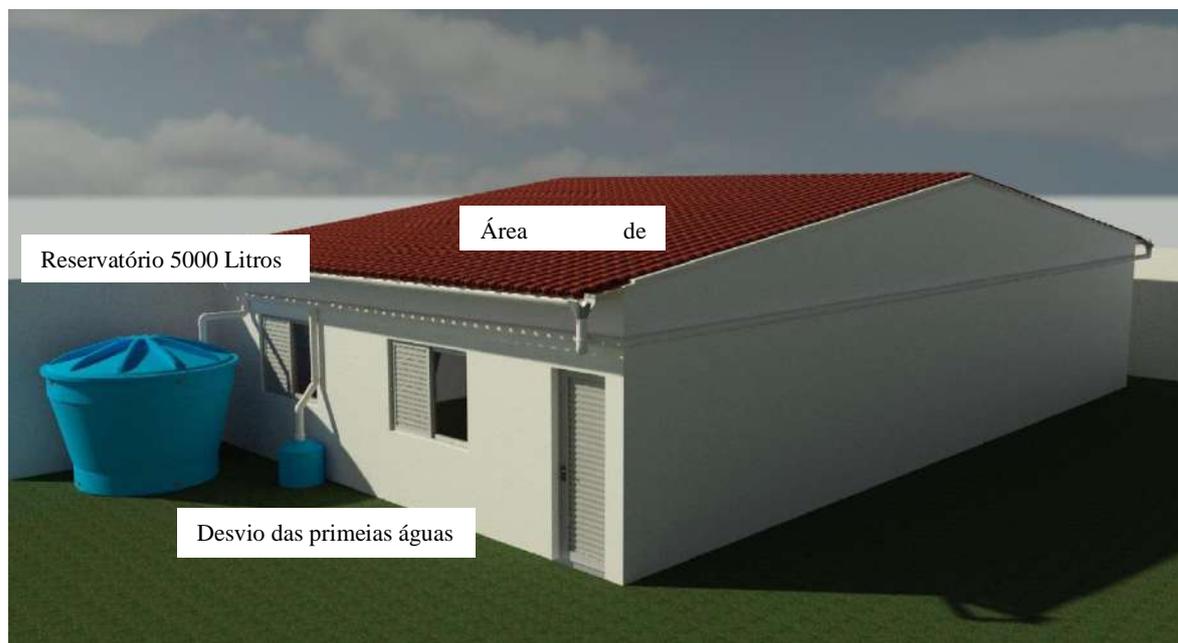
Como resultados, obteve-se um volume ideal para o reservatório de armazenamento de 9500 litros, porém devido a maior necessidade área disponível, para instalação do reservatório no lote, foi utilizado o volume padrão mencionado anteriormente com 5m³.

Figura 61 – Representação do lote modelo padrão de 200 m² simulado com aplicação de técnicas LID.



Fonte: A Autora (2021).

Figura 62 – Representação 3D do lote padrão analisado.



Fonte: A Autora (2021).

Considerando o reservatório ideal de 5.000 litros, o potencial de utilização de água de chuva é de 37,80%. O consumo médio de água pluvial foi de 257 litros/dia (Figura 63), indicando a viabilidade do sistema de aproveitamento de água de chuva. O potencial de economia por meio do uso da água pluvial (55%) se aproxima da demanda nos meses entre março e agosto, indicando um ótimo aproveitamento, podendo ser verificado na coluna “Atendimento completo”, com valores acima de 70%. É possível observar que a coluna “Média diária de recalques” contém somente zeros. Isso ocorre porque nessa simulação não há reservatório superior, logo não há recalque.

Figura 63 – Resultados mensais da simulação com volume ideal de 5.000 litros para o reservatório inferior em Olinda

Mês	Potencial de utilização de água pluvial (%)	Volume consumido de água pluvial (litros)	Volume consumido de água potável (litros)	Volume extravasado (litros)	Atendimento completo (%)	Atendimento parcial (%)	Sem atendimento (%)	Média diária de recalques
Janeiro	28.90	196.53	483.47	237.30	48.71	7.42	43.87	0.00
Fevereiro	34.42	234.08	445.92	229.10	58.58	7.43	33.98	0.00
Março	42.98	292.24	387.76	340.43	76.29	3.39	20.32	0.00
Abril	47.99	326.34	353.66	714.69	85.50	3.50	11.00	0.00
Mai	52.49	356.93	323.07	843.33	94.68	1.29	4.03	0.00
Junho	54.57	371.06	308.94	1203.40	98.83	0.67	0.50	0.00
Julho	54.63	371.46	308.54	742.76	98.87	0.65	0.48	0.00
Agosto	52.65	357.99	322.01	425.59	94.84	1.61	3.55	0.00
Setembro	39.72	270.12	409.88	133.31	67.67	8.17	24.17	0.00
Outubro	14.36	97.68	582.32	15.59	20.81	10.97	68.23	0.00
Novembro	12.08	82.16	597.84	14.49	17.33	9.17	73.50	0.00
Dezembro	18.54	126.08	553.92	134.85	29.35	9.19	61.45	0.00
Média	37.80	257.02	422.98	420.07	66.00	5.27	28.73	0.00
Total ano		93811	154389	153327				

Fonte: A Autora (2021).

Foi realizada uma análise econômica considerando o reservatório padrão e a estrutura tarifária utilizada de acordo com a companhia local de abastecimento, a COMPESA. Foi considerado o acréscimo da tarifa de esgoto, com percentual de 100% em relação a conta de água, sendo dessa maneira a conta mínima com tarifa de R\$ 88,16. A estrutura tarifária residencial varia de acordo com o consumo, podendo ser observado na Tabela 19 a seguir:

Tabela 19 - Estrutura tarifária residencial de acordo com a Compesa

CONSUMO	Até 10.000 litros/mês	10.001 a 20.000 litros	20.001 a 30.000 litros	30.001 a 50.000 litros	50.001 a 90.000 litros
VALOR (R\$)	44,08	5,05	6,01	8,27	9,80

Fonte: Compesa (2021).

É possível perceber que para o reservatório padrão analisado, obteve-se uma economia em todos meses, com a conta de água atingindo a tarifa mínima nos meses junho, julho e agosto e gerando uma economia anual de R\$ 953,12 (Figura 64).

Figura 64 - Estimativa de consumo e economias mensais de água em Olinda

Mês	Consumo total mensal (litros)	Consumo de água pluvial (litros)	Consumo de água potável (litros)	Volume de água pluvial recalcado (litros)	Valor da conta sem utilização de água pluvial (R\$)	Valor da conta com utilização de água pluvial (R\$)	Economia mensal (R\$)
Jan	21080	6092.28	14987.72	0.00	202.14	138.54	63.61
Fev	19040	6554.23	12485.77	0.00	179.46	113.27	66.20
Mar	21080	9059.49	12020.51	0.00	202.14	108.57	93.57
Abr	20400	9790.26	10609.74	0.00	193.97	94.32	99.65
Mai	21080	11064.79	10015.21	0.00	202.14	88.31	113.83
Jun	20400	11131.89	9268.11	0.00	193.97	88.16	105.81
Jul	21080	11515.23	9564.77	0.00	202.14	88.16	113.98
Ago	21080	11097.70	9982.30	0.00	202.14	88.16	113.98
Set	20400	8103.71	12296.29	0.00	193.97	111.35	82.62
Out	21080	3028.02	18051.98	0.00	202.14	169.48	32.66
Nov	20400	2464.77	17935.23	0.00	193.97	168.31	25.66
Dez	21080	3908.50	17171.50	0.00	202.14	160.59	41.55

Fonte: A Autora (2021).

Com base nos dados dos setores censitários urbanos definidos e utilizados pelo IBGE (2010) no levantamento de dados do censo demográfico, 80% dos moradores residem em casa. Assim, foram analisados a aplicação em 25% e 50% do número de domicílios existentes na região por sub-bacia. A Tabela 20 a seguir apresenta 25% e 50% da quantidade de reservatórios por sub-bacia. No PCSWMM é inserido a área superficial de um reservatório e a quantidade total em cada sub-bacia.

Tabela 20 – Quantidade total de microrreservatórios em cada sub-bacia

Sub-bacia	Quantidade de reservatório em cada sub-bacia	
	25%	50%
Sub-bacia 01	845	1691
Sub-bacia 02	541	1081
Sub-bacia 03	2069	4139
Sub-bacia 04	670	1340
Sub-bacia 05	2604	5209
Sub-bacia 06	1941	3882
Sub-bacia 07	1205	2410
Sub-bacia 08	1961	3921
Total	11836	23673

Fonte: A Autora (2021).

Foi analisada a simulação sem reguladores de fluxo no fundo, visto que nesse caso o modelo PCSWMM entende que após não haver mais capacidade de armazenamento no reservatório, o mesmo passa a verter e contribui com o escoamento da bacia. Essa opção é

ativada zerando o coeficiente de fluxo. O regulador de fluxo, do tipo orifício circular possui um diâmetro de 3,2 cm, a fim de que ocorra o transbordamento, quando necessário.

As reduções nos valores de pico se mostraram satisfatórias com redução de até 69% para o tempo de retorno de 2 anos na sub-bacia 1 com aplicação da técnica em 25% das residências, e 70% com aplicação em 50% das residências. Para o tempo de retorno de 100 anos, a técnica continua se mostrando satisfatória, atingindo 61% e 62% de redução na vazão de pico. A sub-bacia 1 apresentou melhores resultados, em virtude do menor percentual de área impermeável, visto que é selecionada a opção para que a descarga do LID seja devolvida para a área permeável da sub-bacia, em vez de ir para a saída para a sub-bacia.

Para as sub-bacias com maiores índices de urbanização, como as sub-bacias 7 e 8, que apresentam aproximadamente 85% de área impermeável, no tempo de retorno de 2 anos, os resultados mostram a redução da vazão de pico em 31% e 33% para as sub-bacias 7 e 8 respectivamente para aplicação em 25% das residências, e 34% e 40% para aplicação em 50% das residências. Para o tempo de retorno de 100 anos, os resultados encontrados são 30% e 32% / 32% e 35%, para as mesmas condições mencionadas anteriormente. Os resultados apresentados podem ser observados na Tabela 21 e 22 a seguir. Podendo concluir que mesmo em áreas mais consolidadas, a técnica apresenta desempenho satisfatório.

Tabela 21 – Redução da vazão de pico por sub-bacia para o tempo de retorno de 2 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 2 ANOS				
	Q pico sem aplicação da técnica LID	Q pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	Q pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	13.35	4.12	69%	4.03	70%
2	22.15	7.45	66%	7.25	67%
3	35.41	10.87	69%	10.7	70%
4	12.82	4.20	67%	4.02	69%
5	41.68	12.94	69%	12.74	69%
6	23.94	12.88	46%	12.03	50%
7	13.31	9.21	31%	8.74	34%
8	22.47	15.05	33%	13.42	40%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 22 - Redução da vazão de pico por sub-bacia adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 100 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 100 ANOS				
	Q pico sem aplicação da técnica LID	Q pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	Q pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	29.21	11.44	61%	11.18	62%
2	50.93	21.77	57%	21.33	58%
3	87.02	30.16	65%	29.39	66%
4	29.55	13.24	55%	12.88	56%
5	105.6	38.63	63%	37.58	64%
6	62.7	36.58	42%	35.26	44%
7	34.94	24.51	30%	23.88	32%
8	59.59	40.67	32%	38.64	35%

Fonte: A Autora (2021).

Em relação ao volume de escoamento, o melhor resultado encontrado foi para o tempo de retorno de 2 anos e para sub-bacia 1, com redução de 42% e 47%, para a aplicação em 25% e 50% das residências, respectivamente. Para o tempo de retorno de 100 anos, atinge-se reduções de 17% e 20%. A sub-bacia que apresentou menor desempenho foi a sub-bacia 7, atingindo para um tempo de retorno de 2 anos, reduções de 6% e 10%. Para o tempo de retorno de 100 anos, os resultados foram ainda menores, atingindo 3% e 5%.

Em relação ao volume total escoado na bacia para o tempo de retorno de 2 anos, houve redução de 20% e 24%. Para o tempo de retorno de 100 anos, a redução foi de 8% e 10%, considerando a aplicação em 25% e 50% das residências, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 23 e Tabela 24 a seguir. Os resultados para os tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos podem ser analisados nas Tabelas no Apêndice C.

Tabela 23 - Redução do volume de escoamento para o tempo de retorno de 2 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 2 ANOS				
	V pico sem aplicação da técnica LID	V pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	V pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	45960	26760	42%	24560	47%
2	87630	70740	19%	68380	22%
3	182900	120900	34%	113100	38%
4	49840	36650	26%	34100	32%
5	244300	177100	28%	166600	32%

6	200700	176100	12%	165500	18%
7	151700	143000	6%	137000	10%
8	158300	147600	7%	137800	13%
TOTAL	1121330	898850	20%	847040	24%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 24 - Redução do volume de escoamento adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 100 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 100 ANOS				
	V pico sem aplicação da técnica LID	V pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	V pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	145200	120200	17%	116800	20%
2	226200	209900	7%	207400	8%
3	438500	377800	14%	368500	16%
4	149400	134600	10%	131600	12%
5	603200	541100	10%	529100	12%
6	424100	404800	5%	395200	7%
7	305700	296900	3%	290900	5%
8	315900	305400	3%	295600	6%
TOTAL	2608200	2390700	8%	2335100	10%

Fonte: A Autora (2021).

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que para as chuvas de menores volumes precipitados (menores durações), a técnica apresenta melhor eficiência, sendo então utilizada com maior frequência, para as quais os investimentos do proprietário não seriam muito elevados e a problemática na drenagem seria minimizada. É notável a influência em relação ao tamanho da área impermeável nas sub-bacias, afetando diretamente os valores do escoamento superficial.

Tal técnica apresenta a vantagem do armazenamento das águas de chuva para outros fins não potáveis, porém para um curto período de tempo. Deve-se orientar a população para realizar o esvaziamento dos reservatórios após o período de precipitação intensa, para que o mesmo esteja apto para receber as próximas precipitações.

A função educacional pode ser aplicada com essa técnica, no sentido de conscientizar a população de sua responsabilidade pela sustentabilidade da drenagem urbana, com diminuição dos impactos hidrológicos resultantes da ocupação do solo e a importância de ações individuais.

Para chuvas com maiores tempo de retorno (maior volume) as propostas de atuação devem ser em conjunto com os poderes públicos e privado, para aplicação de técnicas compensatórias em áreas públicas, como parques e praças, estacionamentos, inclusive associadas a paisagens multifuncionais. Em relação aos erros de escoamento obtidos nesta etapa da simulação, os resultados são apresentados na Tabela 25 e Tabela 26 a seguir.

Tabela 25 – Erros de continuidade na simulação com aplicação dos microrreservatórios em 25% das residências

Tempo de retorno	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2 anos	-0.06%	-0.46%
10 anos	-0.07%	-0.35%
25 anos	-0.07%	-0.30%
50 anos	-0.08%	-0.26%
100 anos	-0.08%	-0.23%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 26 - Erros de continuidade na simulação com aplicação dos microrreservatórios em 50% das residências

Tempo de retorno	Erros de continuidade (%)	
	Escoamento superficial	Roteamento de vazões
2 anos	-0.06%	-0.50%
10 anos	-0.07%	-0.36%
25 anos	-0.07%	-0.30%
50 anos	-0.08%	-0.27%
100 anos	-0.08%	-0.24%

Fonte: A Autora (2021).

Todos os erros de continuidade foram abaixo de 1%, apresentando-se de forma satisfatórias e com erros menores que 10%. Tais valores baixos indicam uma boa qualidade nos resultados da simulação.

7 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar algumas situações de inundações na bacia do rio Fragoso na cidade de Olinda em resposta a diferentes eventos de precipitação pluviométrica de intensidade média e elevada, na parte norte da Região Metropolitana do Recife em Pernambuco.

Peculiaridades geográficas, avanços da urbanização e conseqüentemente alta taxa de impermeabilização, baixas cotas de seu território em relação ao nível do mar, elevada pluviosidade, baixo gradiente hidráulico, lençol freático elevado, influência das marés contribuem para que na região da bacia do rio Fragoso os alagamentos e inundações sejam recorrentes.

Associado a esses fatores, bocas de lobo degradadas contribuem para redução da capacidade da microdrenagem. A falta de manutenção e limpeza contribui para o assoreamento do curso d'água das galerias de despejo das águas pluviais, assim como a presença de vegetação rasteira e destinação incorreta do lixo.

Em relação a análise da urbanização realizado pela Plataforma MapBiomias, ocorreu um grande avanço da infraestrutura urbana, para a bacia do Fragoso, de 13,7% em 1985, crescendo gradativamente ao longo dos anos, atingindo 51% de ocupação urbana, em 2018. Para a sub-bacia 6 o índice de urbanização ultrapassa 70%, e para as sub-bacias 7 e 8 ultrapassa 80% de ocupação, estando diretamente associado as vazões máximas geradas pelo modelo hidrológico e conseqüentemente maiores conseqüências associadas aos problemas de alagamentos.

Para realização das simulações, foram utilizados o modelo hidrológico SWMM e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, que apresentaram bom desempenho para as análises realizadas, mostrando coerência com os alagamentos que ocorrem na região. Os erros de continuidade obtidos em todas as etapas sempre estiveram abaixo dos 10%, indicando uma boa qualidade dos resultados obtidos. Para a modelagem bidimensional, a resolução do MDT na escala de 1:1000 fornecido pelo PE3D, mostrou-se fundamental para uma melhor representação dos resultados.

Analisando a mancha de inundação e a altura atingida pela água antes da construção do canal, obteve-se uma redução da área total alagada se o canal estivesse totalmente concluído na época da cheia de 30 de maio de 2016. Com a obra do canal do Fragoso realizada, as áreas máximas variam de 1,65 km² a 2,00 km², para os tempos de retorno de 2 e 100 anos, respectivamente. Dessa forma, percebe-se que ocorre uma redução nos alagamentos após a

finalização das obras do canal, mas que os problemas de inundação, especialmente para tempo de retorno maiores, ainda persistirão. Os mapas de perigo para os tempos de retorno de 2 e 100 anos, auxiliam na identificação de áreas com maior dano potencial à população.

A bacia do Rio Fragoso possui os problemas de alagamentos acentuados principalmente pela ocupação desordenada, em que muitas residências foram construídas em locais de cota muito baixa, que frequentemente são alagadas e outras moradias ocuparam de forma irregular o leito maior do rio Fragoso, com o estrangulamento da calha do rio e conseqüentemente a diminuição da capacidade de escoamento.

Para a construção da avenida Perimetral foram adotadas medidas para realocação dos moradores para uma região mais adequada, o que melhora consideravelmente a capacidade de escoamento do rio. No entanto, as moradias não são tão próximas ao rio, mas que estão em cotas muito baixas vão continuar sofrendo inundações.

Outro ponto importante na análise das cheias na bacia do Fragoso é a condição de contorno de jusante na foz do rio Fragoso no trecho final do rio Paratibe, próximo da ponte do Janga. Se o nível d'água do rio Paratibe estiver muito elevado, dificulta o escoamento das águas do rio Fragoso na foz, represando as águas e piorando as inundações. As causas para o nível elevado do Paratibe podem ser: chuvas muito intensas na bacia do Paratibe no município de Paulista, marés altas de sizígia, a elevação do nível do mar devido às mudanças climáticas.

Os resultados obtidos com a aplicação a técnica compensatória microrreservatórios de retenção em lotes, com um reservatório padrão de 5 m³, apresentaram reduções nos valores de pico. As sub-bacias que apresentam menor percentual de área impermeável, como a sub-bacia 1, apresentou melhores resultados na redução do pico de vazão. Para as sub-bacias com maiores índices de urbanização, como as sub-bacias 7 e 8, que apresentam aproximadamente 85% de área impermeável, os resultados mostram que os microrreservatórios proporcionam redução da vazão de pico menor. Dessa forma, é possível concluir que mesmo em áreas mais consolidadas, a técnica apresenta desempenho satisfatório, especialmente para as chuvas de menores volumes precipitados (menores durações).

8 RECOMENDAÇÕES

Estudos relacionados a alagamentos e inundações são de extrema importância diante de uma realidade climática instável como atualmente. Assim, atenta-se para a importância de conhecimentos mais avançados nessa área, para gestores públicos e população, em busca da consciência do planejamento urbano e uma sociedade mais adaptada e sustentável.

Assim, é necessário uma maior aproximação dos pesquisadores e dos órgãos públicos às populações vulneráveis, para um maior conhecimento das reais necessidades de cada local, melhor compreensão da drenagem a fim de auxiliar na preparação da cidade para desafios futuros, fornecendo informações relevantes aos órgãos gestores para o desenvolvimento de estratégias e medidas adaptativas.

Dessa maneira, recomenda-se estudos de alternativas que solucionem ou reduzam os problemas relacionados ao aumento do escoamento superficial, não somente que os transfiram para outro local, como a aplicação de outras técnicas de drenagem urbana sustentável, sendo exemplo telhados verde, trincheiras, valas de infiltração, entre outras e mais de uma técnica atuando conjuntamente. Análises com a consideração das variações climáticas para projeção de cenários futuros, análise da resiliência e vulnerabilidade da região. Assim como, levantamento de manchas de inundação para melhores validações do modelo hidrodinâmico e levantamento de modo a permitir a estimativa aprimorada dos prejuízos decorrentes de inundação.

É importante a elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana do município, definindo regras importantes para o uso e ocupação do solo, e diretrizes para soluções não estruturais, associadas a ações de educação ambiental eficientes. Incentivo à implantação de alternativas de controle, fornecendo subsídios como desconto no IPTU, certificações ambientais para empreendimentos comerciais, industriais. Instalação de equipamentos para monitoramento do nível do canal também contribui para calibração e validação de pesquisas futuras.

Importante realizar levantamento e cadastro da microdrenagem, planos de gestão e implantação de legislação, para uma gestão eficiente da drenagem urbana municipal, incluindo também manutenção periódica das galerias e condutos de drenagem para a área estudada, priorizando os serviços de limpeza urbana.

Igualmente tem-se a importância de sistema de previsão e alerta para a população por meios de comunicação e mídias sociais, ações da Defesa civil, operações de reconstrução,

entre outros. Também é importante destacar a manutenção de áreas de preservação ambiental e áreas de amortecimento de cheias.

Recomenda-se a realização de atividades com a população local para a conscientização sobre a importância do sistema de drenagem e dos problemas ocasionados com a impermeabilização dos lotes, a presença do lixo e ocupação irregular das calhas, orientando para a importância de alternativas sustentáveis para os problemas de alagamento, por meio de atividades comunitárias como realização de seminários, folders, comerciais televisivos.

Tal como o entendimento para a retenção das águas nos lotes, contribuindo com as reduções nos valores de pico, a partir do uso da técnica de microrreservatórios, e possível o reúso das águas para diversos fins, proporcionando economia de água potável e economia financeira contribuindo com uma sociedade mais sustentável e consciente com o uso dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ADAMS, S.; AICH, V.; ALBRECHT, T.; BAARSCH, F.; BOIT, A.; CANALES TRUJILLO, N.; CARTSBURG, M.; COUMOU, D.; EDEN, A.; FADER, M.; HARE, B.; HOFF, H.; JOBBINS, G.; JONES, L.; KIT, O.; KRUMMENAUER, L.; LANGERWISCH, F.; LE MASSON, V.; LUDI, E.; MARCUS, R.; MENGEL, M.; MOSELLO, B.; MÖHRING, J.; NORTON, A.; OTTO, I. M.; PERETTE, M.; PEREZNIETO, P.; RAMMIG, A.; RECKIEN, D.; REINHARDT, J.; REYER, C.; ROBINSON, A.; ROCHA, M.; SAKSCHEWSKI, B.; SCHAEFFER, M.; SCHAPHOFF, S.; SCHEWE, J.; SCHLEUSSNER, C.; SERDECZNY, O.; STAGL, J.; THONICKE, K.; WAHA, K. & WORLD, B. **Latin America and the Caribbean: 4o Turn down the heat - confronting the new climate normal**. World Bank Group. V2. 2014. 275p.

ALMEIDA, D. N. O. de.; OLIVEIRA, L. M. M. de.; CANDEIAS, A. L. B.; BEZERRA, U. L.; LEITE, A. C. de S. **Uso e cobertura do solo utilizando geoprocessamento em municípios do Agreste de Pernambuco**. 2018. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.4, n.1. 058-068 (2018)

ALVES, F. H. B. **Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 181 f. 2017.

ALVES, P. B. R. **Simulações de medidas compensatórias sustentáveis de drenagem: propostas em duas microbacias urbanas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande -PB, 130 f. 2017.

AMANTHEA, N. R.; NASCIMENTO, N. de. O. **Urbanização de baixo impacto (LID): Uso de geotecnologias para estimativa do tempo de concentração de bacia em cenário de pré-desenvolvimento**. 2015. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos vol. 20 no.1 Porto Alegre jan./mar. 2015 p. 249 – 266

AMEC. (2001). **Georgia Stormwater Management Manual**, Volume 2: Technical Handbook. AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, Atlanta – USA.

- ANDJELKOVIC, I. Guidelines on non-structural measures in urban flood management. 2001. International Hydrological Programme. Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris.
- APAC. 2020. Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Bacias Hidrográficas**. Disponível em: < http://www.sirh.srh.pe.gov.br/apac/pagina.php?page_id=5>. Acesso em: Maio de 2020.
- ATP – ENGENHARIA LTDA. Elaboração de projeto executivo de engenharia para construção de lagoas de retenção no bairro do Frágoso em Olinda/PE. **Relatório I – Andamento: Estudos**. 2009. Secretaria de Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Pernambuco.
- AZEVEDO, S. C. de. **Deteção e remoção automática dos efeitos das sombras de áreas urbanas em imagens multiespectrais com alta resolução espacial**. 2018. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP). Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP, 137 f.
- BATISTA, L. F. D. R. **Estudo de indicadores de risco de inundação no município do Cabo de Santo Agostinho**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 90 f. 2015.
- BELTRÃO, A. L.; MAIA, J. T.; OLIVEIRA, M. L. et al (1995) – “**Diagnóstico Ambiental do Município de Olinda. Uma contribuição ao Plano Diretor**”. Recife – CPRH.
- BÊRREDO, E. D. de.; BONATTO, D. do A. M. **Desafios e Possibilidades para as Águas Urbanas nas cidades contemporâneas : A bacia hidrográfica como unidade de planejamento para o desenvolvimento e a reabilitação urbana e ambiental**. 2019. Anais XVIII ENANPUR 2019
- BIGNAMI, D.F.; SANFILIPPO, R.R.U. **Flood Proofing in Urban Areas. Chapter 7 - Flood Proofing Methods**. 2019. Springer.
- BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J.G.L., BARROS, M.T.L., VERAS, M.S., PORTO, M.F.A., NUCCI, N.L.R., JULIANO, N.M.A. & EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo, Prentice Hall, 2005. 305p.
- BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. In C. S. Carvalho, E. S. Macedo, & A. T. Ogura (Eds.), Gerenciamento de áreas de risco: medidas estruturais e não-estruturais (pp. 125-139). Brasília: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas.2007.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p.: il.

CAMPIOLI, P. F.; VIEIRA, C. V. **Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 12, n. 01, 2019, p. 124-138.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de Textos, 2005. 302 p.

CARDOSO, C.A. et al. **Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo-RJ**. Árvore, Viçosa, v.30, n.2, p.241-248. 2006.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. 2020. **Mapa Interativo**. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>

CHRISTOFIDIS, H. do V. **Drenagem Urbana Sustentável: Análise do uso do Retrofit**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Brasília – DF. 163 p.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. de A. L. **Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial**. 2014. Revista Brasileira de Geografia Física, vol 07, n.04 (2014) 755-763

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS, P. H. A. L. **PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial**. In: SILUSBA Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 12º, 2015, Brasília, Distrito Federal, Brasil. Anais... Brasília: SILUSBA, 2015.

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, vol 07, n. 04 (2014) 755-763.

CLIMATE AND URBAN SPACES – Climate Adaptation. 2020. Disponível em: <https://urbandevelopmentcph.kk.dk/node/1563>

CLARKE, R.; KING, J. O. Atlas da Água – O mapeamento completo do recurso mais precioso do planeta. 128p. Editora: Publifolha. São Paulo-SP. 2005

COLLISCHONN, W. DORNELLES, F. 2013. **Hidrologia para engenharias e ciências ambientais** – 2ª edição. ABRH.

CONTÉCNICA – Consultoria e Planejamento LTDA, 2014. **Projeto Executivo de Engenharia para Adequação da II Perimetral Metropolitana e Implantação e Pavimentação da Via Metropolitana Norte**. Volume 3B – Notas de Serviços e Mapas de Cubação. Recife – PE.

COSTA, A. M. M. da.; MELO, G. C. F. de.; CRUZ, M. R. da S.; GIRÃO, Osvaldo. **Análise inicial do uso e ocupação em trecho do riacho Ouro Preto – Olinda/PE - e sua influência para a potencialização de eventos de inundações**. 2016. REGNE, Volume 2, nº especial.

COSTA, P. R.; SILVEIRA, A. L. R. da. **Drenagem urbana e os impactos decorrentes do processo de urbanização na Bacia Do Córrego Mingau, Goiânia, GO**. Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia, 11: 76-100, 2017

COUTINHO, M.M. Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatinha/ES. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG, 2015.

COUTINHO, A.P.; LEITE, L. L.; RIBAS, L.V.; ANTONINO, A.C.D.; CABRAL, J.J. da S. P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. 2019. **Coletânea de equações de chuvas intensas para o estado de Pernambuco**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH. Bento Gonçalves/RS.

DER-PE: Departamento de estradas e Rodagem. **Projeto Executivo de Engenharia para Adequação da II Perimetral Metropolitana e Implantação e Pavimentação da Via Metropolitana Norte**. Volume 3B – Notas de serviços e mapas de cubação. 2014. Secretaria de Transportes. Governo do Estado de Pernambuco.

DUARTE, E. W., KRAUSS, L. A. A. **Projeto de dimensionamento das jazidas de fosfato de Pernambuco Recife: CONDEPE**, 1 978.8 8 p.

EMBRAPA – CNPF. **Clima**. Disponível em:
<https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>

EMBRAPA SOLOS. **Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco**. 2000. Boletim de Pesquisa, número 11. Rio de Janeiro-RJ.

ESRI. ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.2 Desktop help**. Disponível

em:<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Flow_Direction>.

Acesso em: 8 ago. 2008.

FAACI – Fundação Ambiental Área Costeira de Itapema. Prefeitura de Itapema. Disponível em: < <https://www.facebook.com/faaciitapema/posts/2575271462509133/>>

FARINA, F. C.; AHLERT, S.; DURANTI, R. R.; SILVA, T. P. da.; FAGUNDES, C. L. **Utilização de imagem de alta resolução espacial para o mapeamento do município de Monte Belo do Sul, RS**. 2007. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 515-521.

FEMA, 1993. **Non-Residential Floodproofing - Requirements and Certification for Buildings Located in Special Flood Hazard Areas in Accordance with the National Flood Insurance Program**. U.S. Federal Emergency Management Agency / Federal Insurance Administration. Technical Bulletin 3-93. Washington D. C, U.S.A.

FERRAZ, G. de F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 117 f. 2019.

FERREIRA, E. de C. **Modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia urbana do riacho Moxotó na cidade de Recife/PE**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 90 f. 2017.

FIDEM – Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – 1995 – Secretaria de Planejamento – Governo do Estado de Pernambuco.

FIJKO, R.; ZELENÁKOVÁ, M.; ALKHALAF, I. (2016). **Flood risk modelling of stuliansky stream in lopúchov village, Slovakia**. Int. J. of Safety and Security Eng., v. 6, n. 3, p. 529-537, 2016.

FILHO, J.E.A.; SALLA, M.R.; REIS, A.; JHUNIOR, H.C. da S. **Influência da progressiva ocupação urbana na ocorrência de áreas inundáveis.** 2017. *Ciência & Engenharia.* v. 26, n. 2, p. 21 – 31, jul. – dez. 2017

FORTUNATO, U. M. C.; SILVA, A. de B.; FERNANDES, L. A. **Análise Espaço-Temporal da fragmentação da Mata Atlântica em Salvador-BA entre 2000 – 2017.** 2019. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Santos-SP.

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

GAIN, A.K.; MOJTAHED, V.; BISCARO, C.; BALBI, S.; GIUPPONI, C. **An integrated approach of flood risk assessment in the eastern part of Dhaka City.** *Natural Hazards*, v. 79, n. 3, p. 1499-1530, 2015.

GAMA, K. N. de C.; BARROS, A. J. de.; LAUDARES, S.; TOTARO, J. H. R.; PAULA, G.A. de. **Processos de urbanização: avaliação dos riscos de Inundação de áreas ribeirinhas do Rio Piracicaba em área do Bairro Santa Cruz e centro industrial, município de João Monlevade-MG.** 2019. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana.*

GIONGO, M. et al. **LiDAR: princípios e aplicações florestais.** *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GÓES, V. C.; CIRILO, J. C. **Geração de base de dados espaciais para estudos de drenagem urbana na Região Metropolitana de Recife, Pernambuco.** 2011. *Revista Brasileira de Cartografia* (2010) No 63/4, p. 555-565 Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto

GOMES, M. M. de A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na Bacia do Rio Capibaribe.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 155 f. 2019.

GUSMÃO FILHO, J. de A. **A Cidade Histórica de Olinda: Problemas e Soluções de Engenharia.** 2001. Editora Universitária da UFPE, Recife-PE. 193p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Cidades.** 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios: síntese de indicadores 2015 / IBGE**. Coordenação de Trabalho e Rendimento. - Rio de Janeiro, 2016. 108p.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Atlas dos manguezais do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2018.

INSTITUTO HIDROGRÁFICO. **Tabela de Marés – Generalidades**, I, 199 págs., Lisboa, Portugal, 2018.

IPCC. **Climate Change 2015: 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.

JACOBI. P. **Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade**. 2003. Cadernos de Pesquisa, (118), 189-206

KHALFALLAHA, C. B.; SAIDIA, S. (2018). **Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia**. Journal of African Earth Sciences, v. 142, p. 44-51, 2018.

KRÜGER, C. M., & DZIEDZIC, M. (2010). **Drenagem Urbana**. Prefeitura Municipal de Curitiba, Instituto Municipal de Administração Pública/IMAP. Plano de Desenvolvimento de Competências.

LIMA, W.P. **Capítulo II – Análise física da bacia hidrográfica**. Livro Manejo de Bacias Hidrográficas. Universidade de São Paulo, 2015.

LOCKS, C. J.; MATRICARDI, E. A. T. **Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LIDAR**. 2019. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 481-495, abr./jun. 2019

LORENZON, A.S.; FRAGA, M.S.; MOREIRA, A.R.; ULIANA, E.M.; SILVA, D.D.; RIBEIRO, C.A.A.S.; BORGES, A.C. **Influência das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Benevente nas enchentes no município de Alfredo Chaves – ES**. Revista Ambiente & Água vol. 10, n.1 – Taubaté – Jan./Mar. 2015.

LOURENÇO, R. **Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis**. Trabalho Científico – Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2014.

MACIEJEWSKA, E. **Redefining cities in view of climatic changes “sponge city” – examples of solutions in Chinese cities at risk of flooding – Wuhan, Changde and Jinhua.** 2020. Acta Sci. Architectura, 19 (1), 11-19.

MASOOD, M.; TAKEUCHI, K. **Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1-D hydrodynamic model.** Natural Hazards, v. 61, n. 2, 757-770, 2012

MAURANO, L. E. P.; ESCADA, M. I. S. **Comparação dos dados produzidos pelo PRODES versus dados do MAPBIOMAS para o Bioma Amazônia.** 2019. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Santos-SP.

MÉDICI, D.; MACEDO, L. **Cidades-esponja: conheça iniciativas pelo mundo para combater enchentes em centros urbanos.** G1. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2020/02/16/cidades-esponja-conheca-iniciativas-pelo-mundo-para-combater-enchentes-em-centros-urbanos.ghtml>

MELO SILVA, B. de. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica para avaliação de inundações na zona urbana de Caruaru, PE.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 108 f. 2019.

MELO, M. J. V. de. **A bacia do rio Fragoso em Olinda-PE: drenagem e gestão ambiental.** 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 183 f. 2003.

MELO, M. J. V. de. **Medidas estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na Bacia do Rio Fragoso na cidade de Olinda.** 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 172 f. 2007.

MIGUEZ, M.G.; MAGALHÃES, L.P.C. de. **Urban Flood Control, Simulation and Management - an Integrated Approach. Methods and Techniques in Urban Engin.** 2010.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D.L.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D. **Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH vol. 21 nº.1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 200 – 208

MONTE, B. E. O.; COSTA, D.D.; CHAVES, M.B.; MAGALHÃES, L. de O.; UVO, C.B. **Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis**. 2016. RBRH vol. 21 no.1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 152 – 167

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. **Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação**. REGA, v. 10, p. 13-25, July/Dec. 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARNEL, R. D.; VEITH, T. L. 2007. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(3): 885–900

NASCIMENTO, G. A. **Vida ao Beberibe: ocupação de áreas ribeirinhas e drenagem urbana, o ciclo de impactos na Unidade de Esgotamento 17**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Artes e Comunicação. Recife-PE. 109 f.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models Part I- A discussion of principles**. Journal of Hydrology, v. 10, n. 10, p. 282–290, 1970.

NOVAES, F. **Olinda: evolução urbana**. 1990. Recife, FUNDARPE.

NUNES, D. M.; FONSECA, P. L. da.; SILVA, L. P. da. **Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na Cidade do Rio de Janeiro**. 2017. Labor & Engenho, Campinas [SP] Brasil, v.11, n.3, p.374-393, jul./set. 2017.

OLIVEIRA SILVA, P. **Modelagem hidrológica do rio Tejió por ocasião de chuvas intensas levando em conta o efeito de marés**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 232 f. 2019.

OLIVEIRA, F.A. de.; ARANTES, C.Q.; OLIVEIRA, J.A.de.; PEREIRA, T.S.R.; FORMIGA, K.T.M. **Determinação do limite da faixa de inundação com uso do HEC-RAS para o parque linear do Córrego Macambira em Goiânia, Goiás**. 2016. Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Volume 11, nº 1, 57-66.

ONU - Organização das Nações Unidas. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. 2019. Disponível em: <https://unric.org/pt/onu-preve-que-cidades-abriguem-70-da-populacao-mundial-ate->

[2050/#:~:text=Segundo%20a%20ONU%2C%20atualmente%2055,implementando%20procesos%20de%20pol%C3%ADticas%20descentralizadas](#). Acesso em: 02 de julho de 2020.

OPENSTREETMAP. 2018. Disponível em: < <https://www.openstreetmap.org/#map=4/-15.13/-53.19>>. Acesso em: março/2020.

PCSWMM - Professional Educational single-user license. CHI University Grant Program Notice of Award. 147 Wyndham Street North, Suite 202, Guelph, Ontario Canada N1H 4E9

PEREIRA, M. C. S.; MARTINS, J. R. S.; MARTINS, R.S. **Potencial de aplicação de infraestrutura verde na Bacia de drenagem do Córrego Belini**. 2019. Revista LABVERDE V. 9 N° 2 – Artigo 02 Maio de 2019

POMPÊO, C.A. **Drenagem Urbana Sustentável**. 2000. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 5, no 1, jan/mar 2000, pp. 15-24.

Projeto MapBiomias – Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em março 2020, através do link: < <https://mapbiomas.org/>>.

Portal de Notícias Exame Abril. **Em 30 anos transtornos com alagamentos só aumentaram em São Paulo**. 2020. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/brasil/em-30-anos-transtornos-com-alagamentos-so-aumentaram-em-sao-paulo/>. Acesso em:

ZIMMERMANN, N. **Berlim: "cidade-esponja" na luta contra o aquecimento global**. 2020. Portal DW Made for minds. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/berlim-cidade-esponja-na-luta-contr-o-aquecimento-global/a-19421977>

Portal G1 Globo de Notícias – Minas Gerais. **Topografia e urbanização de Belo Horizonte agravam as consequências no período chuvoso**. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/29/topografia-e-urbanizacao-de-belo-horizonte-agravam-as-consequencias-no-periodo-chuvoso.ghtml>. Acesso em:

Portal Scandinavianway - **Como são as “cidades à prova de chuva” da Dinamarca**. 2020. Disponível em: <https://scandinavianway.com.br/cidades-esponja-enchentes-dinamarca/>

RECIFE, 2015. Lei nº 18.112 - Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Disponível em: <http://leismunicipa.is/cjeuk>. Acesso: Julho 2020.

REZENDE, N. das G. de A. da M. 1994. **O Fosfato de Olinda e os Conflitos de Mineração**. Recife: CPRM. 19p.

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

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. **Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas:municipality of Ipojuca/PE**. RBRH vol. 21 no.2 Porto Alegre abr./jun. 2016 p. 377 – 390

RICARDO, J. J. V. **Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável**. Artigo Científico – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2009.

ROMALI, N. S.; YUSOP, Z.; ISMAIL, A. Z. (2018). **Application of HEC-RAS and ArcGIS for floodplain mapping in Segamat town, Malaysia**. International Journal of GEOMATE, 14, p.125-131, 2018.

ROSA, M. R. **Atlantic Forest – Appendix. Collection 4**. Version 1, 2019, MAPBIOMAS. Disponível em: <https://mapbiomas.org/estatistica-de-acuracia-1>

ROSSI, D. M. **Avaliação do impacto da distribuição espacial da precipitação e da geomorfologia da bacia na eficiência de reservatórios de detenção**. 2014. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo- SP.

ROSSI, E., & SOUSA, L. M. G. (2012). **Ecotécnicas de drenagem urbana: urbanização de impacto ambiental reduzido**. In: Simpósio de pós-graduação em engenharia urbana, Maringá. Caderno de Resumos – SIMPGEU. Maringá: UEM, (3), 97-97.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised)**. Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office Of Research And Development U.s. Environmental Protection Agency, 2016. 233 p.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality**. Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office Of Research And Development U.s. Environmental Protection Agency, 2016. 161 p.

ROTTERDAM CLIMATE PROOF. Adaptation Programme. 2008. Disponível em: <
<https://sdr.gdos.gov.pl/Documents/Wizyty/Belgia%20i%20Holandia/Program%20adaptacji%20do%20zmian%20klimatu%20w%20Rotterdamie.pdf>>

SANTOS, A.M.; TARGA, M.S.; BATISTA, G.T.; DIAS, N.W. **Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil.** Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 7, n.3, 2012.

SANTOS, D.A.R.; MORAIS, F.D. **Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão – TO.** Revista Geonorte, Manaus, Edição Especial, v.3, n.4, p. 617-629, 2012.

SANTOS, N. M. dos; MEDEIRO, F. S.; SANTOS, N. A.; VASCONCELOS, R. N. de; ROCHA, W. de J. S. da. **Análise Multitemporal da dinâmica de uso e cobertura do solo na Região do Médio São Francisco.** 2019. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Santos-SP.

SARTORI, A.; NETO, F.L.; GENOVEZ, A.M. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação.** 2005. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.4 Out/Dez 2005, 05-18

SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana.** São Paulo: SMDU, 2012.

SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO E LICENCIAMENTO (SMUL) - Prefeitura de São Paulo. **Quota Ambiental.** 2020. Disponível em: <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/cota-ambiental-2/>

SHAHIRIPARSA, A.; NOORI, M.; HEYDARI, M.; RASHIDI, M. (2016). **Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the Sungai Maka River.** Air, Soil and Water Res., 9, p. 55-62, 2016.

SHARMA, A.K.; PEZZANITI,D.; MYERS,B.; COOK,S.; TJANDRAATMADJA, G.; CHACKO,P.; CHAVOSHI,S.; KEMP, D.; LEONARD. R.; KOTH, B.; WALTON,A. **Water Sensitive Urban Design: An Investigation of Current Systems, Implementation Drivers, Community Perceptions and Potential to Supplement Urban Water Services.** 2016. Journal Water 2016, 8, 272.

- SHAWUL, A. A.; CHAKMA, S.; MELESSE, A. M. 2019. **The response of water balance components to land cover change based on hydrologic modeling and partial least squares regression (PLSR) analysis in the Upper Awash Basin.** Journal of Hydrology: Regional Studies 26 (2019) 100640
- SILVA, O. de L. C.; GOMES, A. S.; LOPES, S. N.; MATOS, A. B. de.; FILHO, P. A. da. **Avaliação dos impactos causados pelas enchentes em regiões ribeirinhas na cidade de Boa Vista/RR.** 2017. Revista de Ciência e Tecnologia. Volume 3, nº 4.
- SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. **Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas utilizando dados Srtm.** 2010. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev. 2010
- SOUSA, C. A. F. de.; OLIVEIRA, B. M. de; SILVEIRA, J. A. R. da. **Urbanização e impactos ambientais nos rios urbanos: Um estudo de caso na Bacia do Rio Gramame em João Pessoa, PB.** Cidades Verdes. Volume 06, nº 13, 2018.
- SOUZA, C.F.; TUCCI, C.E.M. **Desenvolvimento Urbano de baixo impacto.** 2005. Conferência I Águasul – I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul. Março/2005.
- SOUZA, F.P. **Monitoramento e modelagem hidrológica de Sub-Bacia do Lago Paranoá - Brasília/DF - e avaliação de bacias de e detenção.** 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília/DF. 139 f.
- STIGLER, S.H.; BAYER, J.L.; MOCHIZUKI, J. **Flood Proofing Low-Income Houses in India: an Application of Climate-Sensitive Probabilistic Benefit-Cost Analysis.** 2019. EconDisCliCha (2019) 3:23–38
- STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology.** Transaction of American Geophysical Union, Washington, v.38, n.6, p.913-920, ago. 1957.
- TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva de telhados em áreas urbanas para fins não potáveis.** 6º Simpósio Brasileiro de Captação de Água de Chuva. Belo Horizonte- MG, 2007.
- TONELLO, K.C.; DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; RIBEIRO, C.A.A.S.; LEITE, F.P. **Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG.** Revista Árvore, Viçosa – MG, V.30, n.5, p. 849-857, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação** - 3ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

TUCCI, C.E.M. **Águas urbanas. Estudos Avançados**, 22 (63), 97-112. 2008. Recuperado de <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10295>

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.P. **Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network**. Journal of Hydrology, Amsterdam, v.240, n.3, p.225-242, 2001.

Urban HUB - Pessoas dando forma às cidades - **Protegendo as cidades costeiras contra o aumento do nível do mar e as enchentes**. 2018. Disponível em: https://www.urban-hub.com/pt-br/energy_efficiency/protegendo-cidades-costeiras-contras-enchentes/

USACE. **River Analysis System HEC-RAS: 2D Modeling User's Manual**. 2016c. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 171 p.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS: Hydraulic Reference Manual**. 2016b. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 547 p.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS: User's Manual**. 2016a. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 962 p.

USDA – United States Department of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds - Technical Release 55**. 1986. Natural Resources Conservation Service.

VALERIANO, M. M. 2008. **TOPODATA: Guia para utilização dos dados geomorfológicos locais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 75p. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 20/05/2020.

VAN LIEW, M. W; VEITH, T.L.; ARNOLD, J.G. **Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds**. Journal Of Hydrologic Engineering, v. 12, n. 2, p.173-189, 2007.

VERÇOSA, L. F. de M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE**. Dissertação (Mestrado) – Universidade

Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 114 f. 2019.

WORLDPOP. 2018. Disponível em: < <https://www.worldpop.org/>>. Acesso em: março/2020.

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

ZAPPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2002. 167p. P.hD. Thesis.

EMBRAPA SOLOS. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE). 2001. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Recife-PE.

ZONSEIN, J. **Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

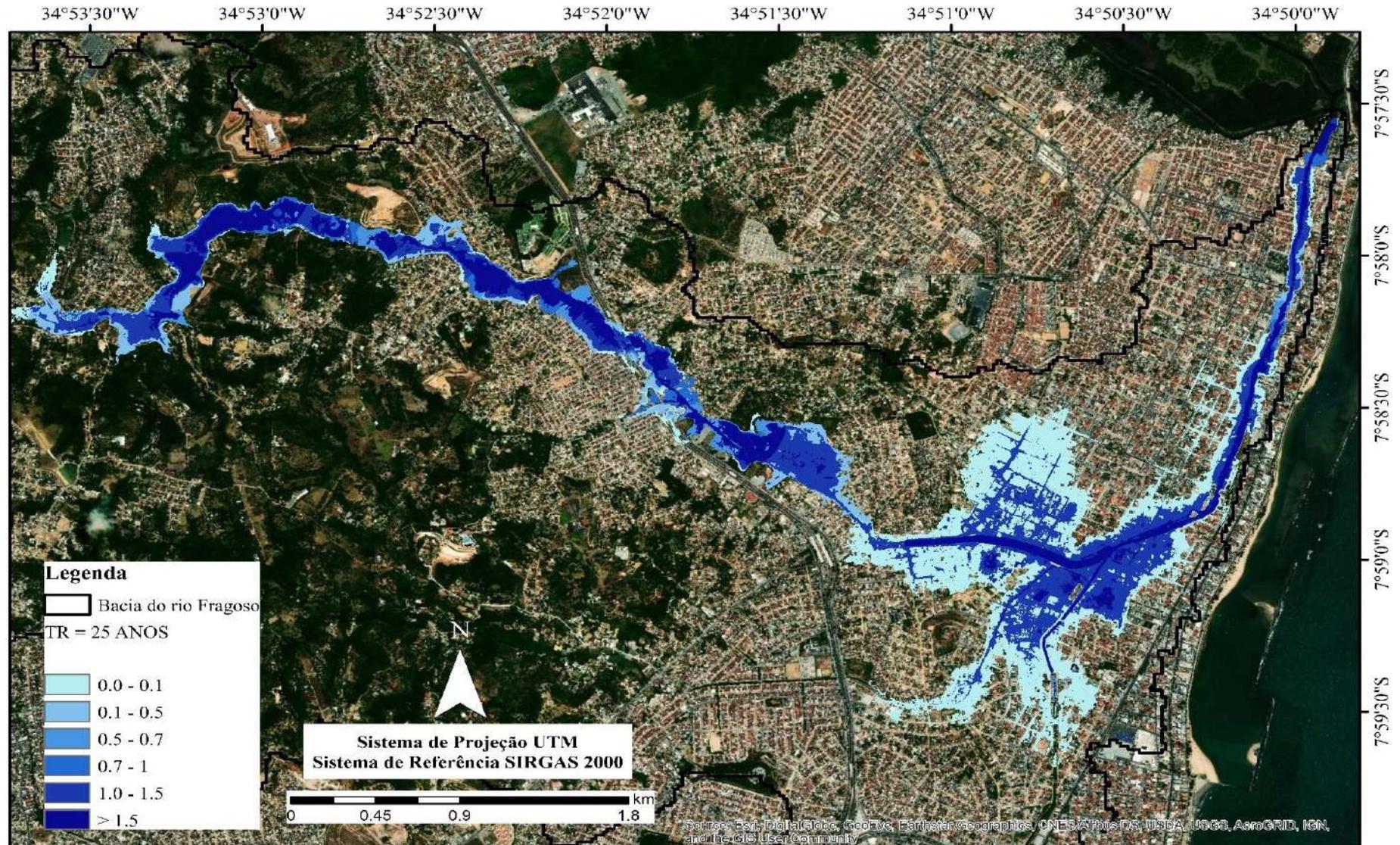
**APÊNDICE A – MAPAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO ANTES DA OBRA
CONCLUÍDA DO CANAL DE FRAGOSO**

Figura A1 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 10 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso.



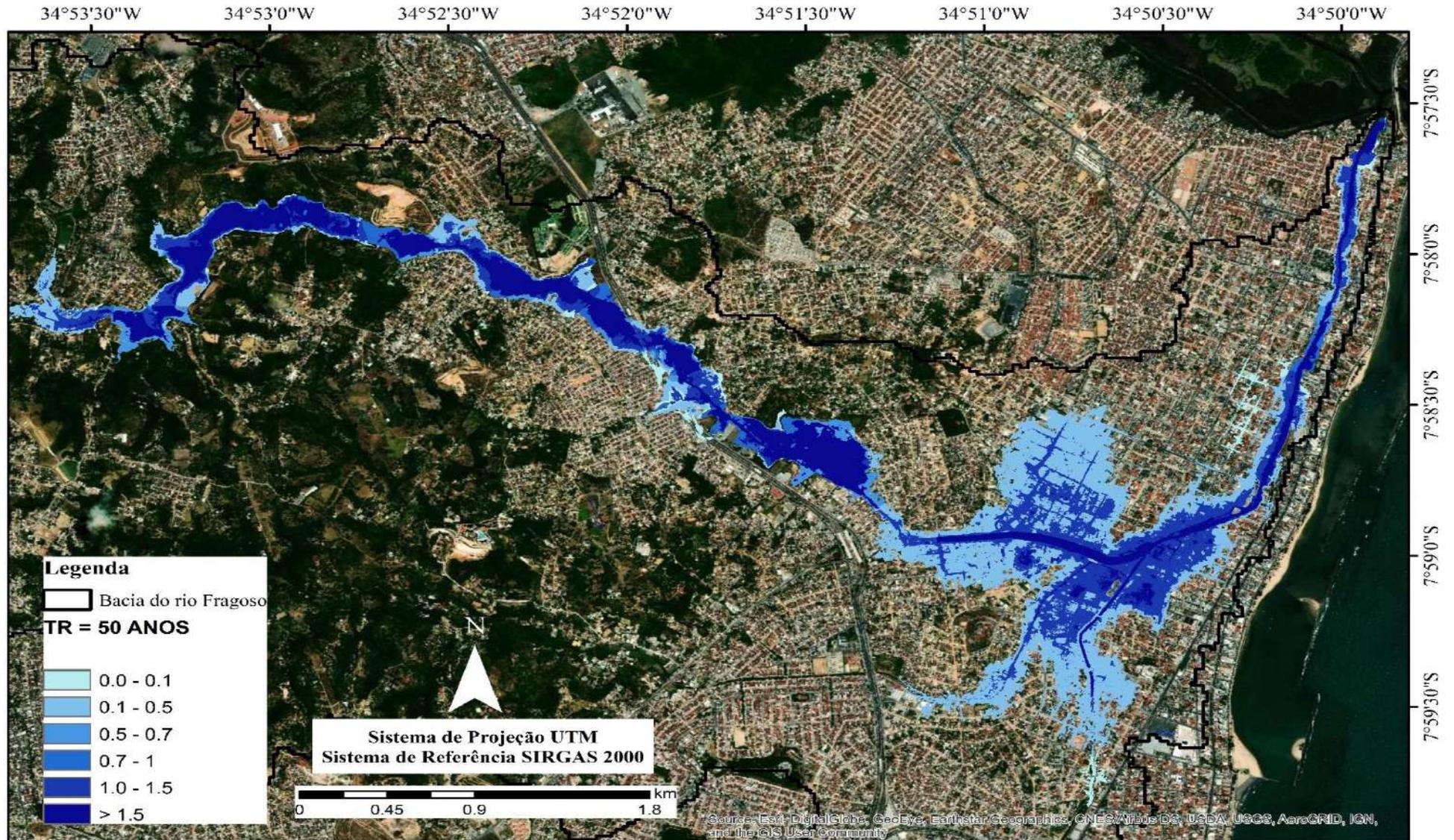
Fonte: A Autora (2021).

Figura A2 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 25 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso.



Fonte: A Autora (2021).

Figura A3 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 50 anos antes da obra concluída do canal do Fragoso.



Fonte: A Autora (2021).

**APÊNDICE B - MAPAS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO CONSIDERANDO A OBRA
DO CANAL DO FRAGOSO FINALIZADA**

Figura B1- Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Fragoso para o tempo de retorno de 10 anos considerando a obra do canal finalizada.



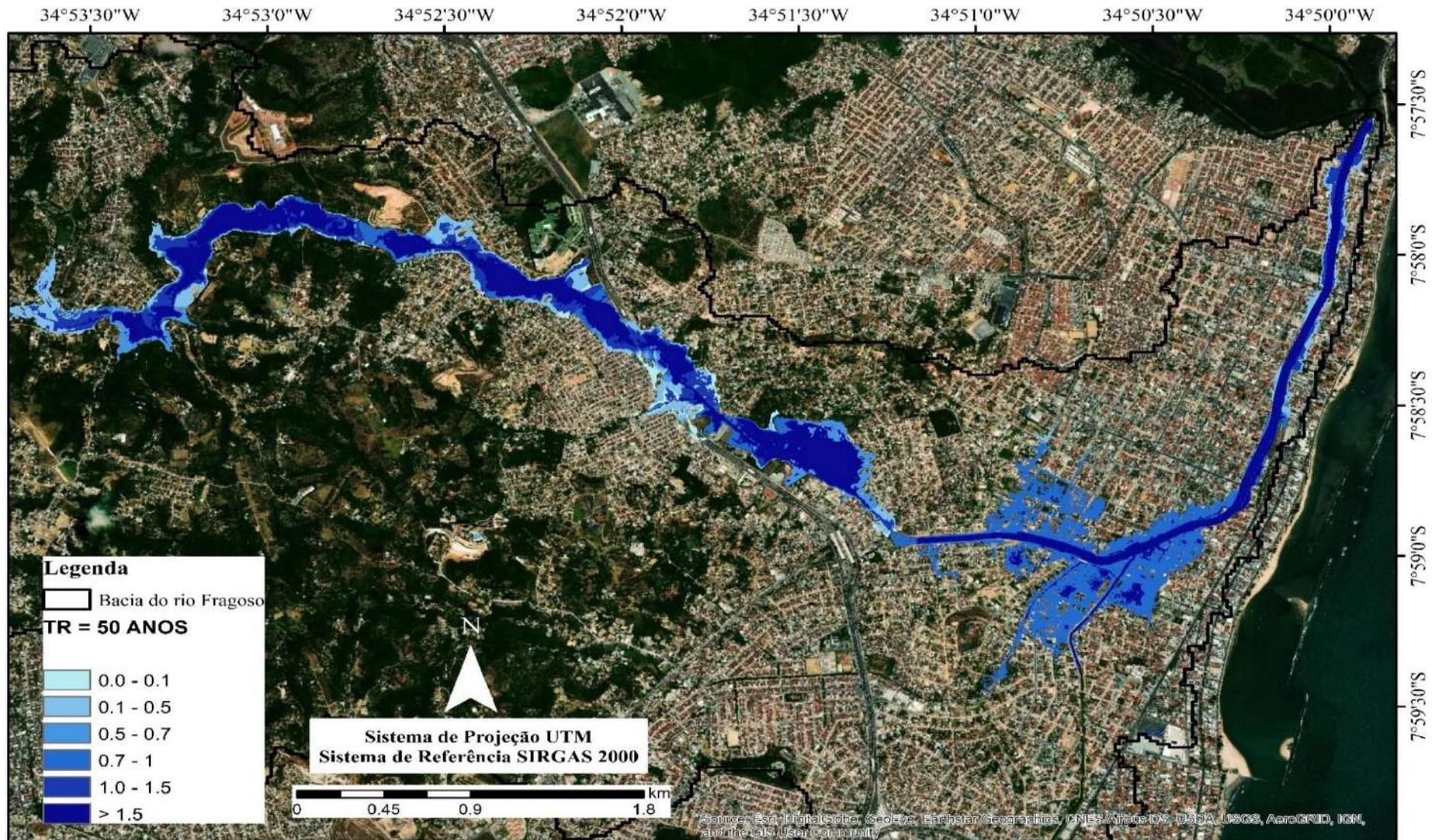
Fonte: A Autora (2021).

Figura B2 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Frágoso para o tempo de retorno de 25 anos considerando a obra do canal finalizada.



Fonte: A Autora (2021).

Figura B3 - Mapa da mancha de inundação na Bacia do Rio Frágoso para o tempo de retorno de 50 anos considerando a obra do canal finalizada.



Fonte: A Autora (2021).

APÊNDICE C – TABELAS RESUMO INDICANDO A REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO POR SUB-BACIA E REDUÇÃO DO VOLUME DE ESCOAMENTO ADOTANDO MICRORRESERVATÓRIOS SEM ORIFÍCIOS DE FUNDO PARA DIFERENTES TEMPO DE RETORNO

Tabela C1 – Redução da vazão de pico por sub-bacia para o tempo de retorno de 10 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 10 ANOS				
	Q pico sem aplicação da técnica LID	Q pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	Q pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	18,18	6,0	67%	5,81	68%
2	31,03	11,42	63%	11,13	64%
3	51,47	16,44	68%	16,00	69%
4	17,81	6,47	64%	6,18	65%
5	61,36	19,94	68%	19,35	68%
6	35,17	19,89	43%	18,88	46%
7	19,89	13,85	30%	13,29	33%
8	33,93	22,87	33%	20,99	38%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela C2 - Redução do volume de escoamento adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 10 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 10 ANOS				
	V pico sem aplicação da técnica LID	V pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	V pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	72690	51100	30%	48280	34%
2	129900	113200	13%	110700	15%
3	259800	197300	24%	188600	27%
4	78830	64910	18%	62080	21%
5	353800	287900	19%	276500	22%
6	274000	251000	8%	241400	12%
7	203200	194400	4%	188400	7%
8	211000	200400	5%	190600	10%
TOTAL	1583220	1360210	14%	1306560	17%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela C3 – Redução da vazão de pico por sub-bacia para o tempo de retorno de 25 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 25 ANOS				
	Q pico sem aplicação da técnica LID	Q pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	Q pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	21,85	7,59	65%	7,34	66%
2	37,71	14,7	61%	14,35	62%
3	63,51	20,88	67%	20,32	68%
4	21,66	8,43	61%	8,07	63%
5	76,24	25,7	66%	24,83	67%
6	44,01	25,4	42%	24,29	45%
7	24,98	17,4	30%	16,8	33%
8	42,6	28,92	32%	26,92	37%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela C4 - Redução do volume de escoamento adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 25 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 25 ANOS				
	V pico sem aplicação da técnica LID	V pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	V pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	95580	72630	24%	69550	27%
2	162300	145800	10%	143300	12%
3	319400	257300	19%	248400	22%
4	102100	87780	14%	84860	17%
5	437800	373300	15%	361600	17%
6	326400	304800	7%	295200	10%
7	239300	230600	4%	224600	6%
8	248000	237400	4%	227600	8%
TOTAL	1930880	1709610	11%	1655110	14%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela C5 – Redução da vazão de pico por sub-bacia para o tempo de retorno de 50 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 50 ANOS				
	Q pico sem aplicação da técnica LID	Q pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	Q pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	25,32	9,21	64%	8,90	65%
2	43,99	17,97	59%	17,58	60%
3	74,73	25,21	66%	24,55	67%
4	25,36	10,58	58%	10,37	59%
5	90,2	31,7	65%	30,75	66%
6	52,86	30,62	42%	29,43	44%
7	29,76	20,79	30%	20,15	32%
8	50,71	34,51	32%	32,58	36%

Fonte: A Autora (2021).

Tabela C6 - Redução do volume de escoamento adotando microrreservatórios sem orifícios de fundo para o tempo de retorno de 50 anos

Sub-bacias	TEMPO DE RETORNO = 50 ANOS				
	V pico sem aplicação da técnica LID	V pico com aplicação da técnica LID em 25% das residências	Redução	V pico com aplicação da técnica LID em 50% das residências	Redução
1	118500	94570	20%	91310	23%
2	192700	176300	9%	173800	10%
3	375800	314400	16%	305300	19%
4	124400	109900	12%	107800	13%
5	516500	453300	12%	441400	15%
6	373500	353100	5%	343500	8%
7	271400	262700	3%	256700	5%
8	280900	270300	4%	260500	7%
TOTAL	2253700	2034570	10%	1980310	12%

Fonte: A Autora (2021).