



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

MARCOS ANTONIO BARBOSA DA SILVA JUNIOR

**ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM
URBANA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO CANAL DERBY-
TACARUNA EM RECIFE - PE**

Recife

2024

MARCOS ANTONIO BARBOSA DA SILVA JUNIOR

**ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM
URBANA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO CANAL DERBY-
TACARUNA EM RECIFE - PE**

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

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

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

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva Junior, Marcos Antonio Barbosa da.

Estratégias de adaptação da infraestrutura de drenagem urbana às mudanças climáticas na bacia do canal Derby-Tacaruna em Recife - PE / Marcos Antonio Barbosa da Silva Junior. - Recife, 2024.

179f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Orientação: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Inclui referências, apêndices e anexos.

1. Drenagem urbana; 2. Clima; 3. SWMM; 4. Adaptação. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

MARCOS ANTONIO BARBOSA DA SILVA JUNIOR

**ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM
URBANA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO CANAL DERBY-
TACARUNA EM RECIFE - PE**

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

Aprovada em 21/11/2024

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

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Sylvana Melo dos Santos (examinadora interna)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga (examinador externo)

Universidade Federal de Goiás

Participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Marina Batalini de Macedo (examinadora externa)

Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares (examinador externo)

Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em meio a tempos pandêmicos, que duraram quase dois anos, muitos obstáculos surgiram durante o doutoramento, me levando a acreditar, por muitas vezes, que esta pesquisa não seria possível. Hoje, com a Tese concluída, é chegada a hora de agradecer àqueles que me ajudaram a chegar até aqui!

A Deus, em todas as suas formas e representações, que me concedeu saúde, força e perseverança para vencer as dificuldades e superar os desafios.

À minha família. Em especial, aos meus pais, Cristina e Marcos, que acompanharam de perto toda a minha trajetória acadêmica e profissional, sempre me apoiando, torcendo e me incentivando nas horas difíceis de desânimo e cansaço. Às minhas avós, Maria José e Auriclélia Barbosa, que através das suas orações me fizeram forte e confiante. Ao meu irmão Müller, sempre solícito nos trabalhos de campo. À minha irmã Monique, pelas conversas e incentivo. Aos meus sobrinhos/filhos Luanna, Tales (o gatão), Millena e Marina, que, ainda, não têm a noção do quão foram importantes durante esse processo. À David Carmo, pelo companheirismo e suporte emocional, principalmente durante o período de finalização desta Tese. É por vocês, a minha caminhada até aqui!

Ao meu orientador Prof. Dr. Jaime Cabral, pela amizade, orientação, confiança e grande apoio fornecido durante o desenvolvimento desta Tese.

Aos professores e técnicos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEG/UFPE). Aos colegas do Grupo de Recursos Hídricos (GRH), pelos momentos compartilhados, troca de ideias e parcerias em produções científicas durante o doutorado: Gastão, Arivânia, Yuri, Alisson, Alexson, Larissa, Bruno, Ana Cláudia, Adson e Cléber.

À Prefeitura do Recife, representada pela Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana (Emlurb), na pessoa do engenheiro Pedro Oliveira, pelo apoio fornecido no desenvolvimento desta Tese, cedendo todos dados e informações necessárias.

À Rosemira Santos, engenheira da Emlurb e “Guardiã dos Canais do Recife”, que teve uma grande importância nos trabalhos de campo desta Tese, ajudando-me bastante na instalação das estações de monitoramento do nível d’água e na coleta dos dados, além de compartilhar comigo toda a sua vivência com a drenagem urbana do Recife. Rose, você não existe! Obrigado por tudo e por tanto!

Ao Porto do Recife S/A, em especial ao engenheiro José Divard de Oliveira Filho e à sua equipe, por permitir a instalação do medidor de nível d'água no local do antigo marégrafo do Porto, viabilizando, também, o acesso ao local para a coleta dos dados monitorados.

Ao Prof. Sílvio Jacks Garnés, do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE, por disponibilizar os relatórios produzidos com os dados interpolados de marés previstas.

À Poli/UPE, UFPE e UFOPA, pela experiência adquirida como docente durante o doutorado. Aos professores dessas instituições, pela troca de ideias, opiniões e conhecimentos compartilhados: Simone Rosa, Roberta Alcoforado, José Roberto Gonçalves, Anderson Paiva, Sylvana Santos, Andryo Henrique, Marcela Santos e Jomara Mendes. Aos meus alunos do curso de Engenharia Civil da UFOPA, John Witysel e Lucca Adib, pelo suporte na montagem dos mapas e organização dos anexos desta Tese.

Às amigas Ana Karla Batista, Thaísa Macedo e Camilla Pires, que me acompanham desde a faculdade e sempre me incentivaram a alcançar este objetivo. Às amigas Cris Lima e Kelly Afro, pelos momentos de descontração, companheirismo e conversas motivadoras que me ajudaram a seguir. À amiga Marieli Donina, pelo suporte no processamento dos dados no Autocad/Civil3D. Sou grato a vocês pela parceria e apoio de sempre!

À FACEPE, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao CNPq, pelo aporte financeiro que permitiu a compra dos equipamentos (sensores de nível + *datalogger*) para a obtenção dos dados primários desta Tese.

E, por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha trajetória pessoal, acadêmica e profissional ao longo desses anos de doutorado, fazendo com que esta Tese se tornasse possível.

RESUMO

Os efeitos das alterações climáticas globais têm provocado impactos significativos nos sistemas de drenagem urbana das grandes cidades. Tal situação fica mais agravada em áreas de planícies costeiras e estuarinas, como é o caso do Recife-PE, que figura entre as vinte cidades mais vulneráveis do mundo às mudanças do clima devido à ocupação urbana desordenada, pluviosidade elevada, baixa altitude e drenagem vulnerável às oscilações de maré. Assim, discussões acerca de medidas adaptativas para a infraestrutura de drenagem urbana são necessárias e urgentes na agenda política da cidade. Como contribuição a essa temática, esta Tese avaliou estratégias de adaptação da infraestrutura de drenagem urbana na bacia do canal Derby-Tacaruna, que visem o enfrentamento às mudanças do clima a partir de cenários de elevação de nível do mar e aumento da intensidade das chuvas. Para isso, inicialmente, fez-se um prognóstico do clima da cidade, baseado: na detecção de tendências em séries temporais hidroclimáticas, por meio de regressão linear simples e testes de Mann-Kendall e Curvatura de Sen, usando o *software* estatístico acoplado a planilhas eletrônicas, o XLSTAT; e nas projeções climáticas do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), regionalizadas para o local por meio dos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Também foram implantadas 4 estações para o monitoramento do nível d'água e dos remansos de maré na macrodrenagem da área estudada, com medições a cada 15 minutos, para um ano hidrológico (2021-2022). Tais dados deram subsídios à construção de cenários de mudança do clima, que contemplou horizontes temporais de 2040, 2070 e 2100, e permitiu uma análise de vulnerabilidade local atual e futura, com o *software* SWMM (*Storm Water Management Model*). O prognóstico indicou algumas tendências positivas, com significância estatística, nas séries temporais hidroclimáticas de precipitação e temperatura para o Recife (1961-2017), acendendo um alerta para o aumento da ocorrência de chuvas extremas ($\geq 100\text{mm}/24\text{h}$). Na modelagem hidráulico-hidrológica, foram propostas, simuladas e analisadas 2 estratégias: 1 – funcionamento da comporta do Eixo Sul e aumento de infraestrutura verde, com 25% de Taxa de Solo Natural nos lotes; e 2 – aumento da capacidade de bombeamento na estação existente e inclusão de nova estação. Na Estratégia 1, para a chuva de 127,7 mm e amplitude de maré de 1,40 m, observou-se reduções médias de 24,48%, 17,6% e 10% nos níveis d'água do canal para cenários F1 (2040), F2 (2070) e F3 (2100), respectivamente. Para a Estratégia 2, com bombeamento de 6,48 m³/s, não haveria transbordamento do canal na área do Parque Amorim, para chuvas com intensidades menores que 10 mm/h. Em suma, com esta Tese, espera-se contribuir na divulgação do desempenho de infraestruturas adaptativas na de drenagem de cidades costeiras e estuarinas, e no caso do Recife, servir de referência aos gestores locais na tomada de decisão e na definição de alternativas viáveis em cenários de mudança do clima.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Clima. SWMM. Adaptação.

ABSTRACT

The effects of global climate change have had a significant impact on the urban drainage systems of large cities. This situation is more aggravated in coastal plain and estuarine areas, such as Recife-PE, which ranks among the twenty most vulnerable cities in the world to climate change due to disorderly urban occupation, high rainfall, low altitude and drainage vulnerable to tidal oscillations. Discussions about adaptive measures for urban drainage infrastructure are therefore urgently needed on the city's political agenda. As a contribution to this theme, this thesis evaluated adaptation strategies for urban drainage infrastructure in the Derby-Tacaruna canal basin, aimed at coping with climate change based on scenarios of rising sea levels and increased rainfall intensity. To this end, a prognosis of the city's climate was initially made, based on: the detection of trends in hydroclimatic time series, by means of simple linear regression and Mann-Kendall and Sen's Curvature tests, using statistical software coupled to electronic spreadsheets, XLSTAT; and IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) climate projections, regionalized for the site using the Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES and Eta-CanESM2 models. Four stations were also set up to monitor water levels and tidal backwaters in the macro-drainage of the area studied, with measurements every 15 minutes for one hydrological year (2021-2022). This data was used to build climate change scenarios, which included time horizons of 2040, 2070 and 2100, and allowed for an analysis of current and future local vulnerability, using the SWMM (Storm Water Management Model) software. The prognosis indicated some positive trends, with statistical significance, in the hydroclimatic time series of precipitation and temperature for Recife (1961-2017), raising the alarm about the increase in the occurrence of extreme rainfall ($\geq 100\text{mm}/24\text{h}$). In the hydraulic-hydrological modeling, 2 strategies were proposed, simulated and analyzed: 1 - operation of the Southern Axis sluice gate and increase in green infrastructure, with a 25% Natural Soil Rate on the lots; and 2 - increase in pumping capacity at the existing station and inclusion of a new station. In Strategy 1, for 127.7 mm of rain and a tidal range of 1.40 m, there were average reductions of 24.48%, 17.6% and 10% in the canal's water levels for scenarios F1 (2040), F2 (2070) and F3 (2100), respectively. For Strategy 2, with pumping of 6.48 m³/s, there would be no overflow of the canal in the Amorim Park area, for rainfall intensities of less than 10 mm/h. In short, this thesis hopes to contribute to the dissemination of the performance of adaptive drainage infrastructures in coastal and estuarine cities, and in the case of Recife, to serve as a reference for local managers when making decisions and defining viable alternatives in climate change scenarios.

Keywords: Urban Drainage. Climate. SWMM. Adaptation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Alagamentos de maré alta. a) Joinville/SC (BRA); b) Santos/SP (BRA); c) Veneza (ITA); d) Miami (EUA).	26
Figura 2.	Cidades com mais de 1 milhão de hab., em sua área metropolitana, mais vulneráveis ao aumento do NMM.	27
Figura 3.	Cenários climáticos projetados pelo CMIP5 para 2100.	31
Figura 4.	Estuário Comum do Recife.	44
Figura 5.	Alagamentos no bairro de Santo Amaro por maré de 2,7 m. A) Rua da Aurora; B) Rua Capitão Lima.	46
Figura 6.	Frequências mensais absolutas dos eventos ocorridos entre 1961 e 2017 no Recife, por faixa de chuva.	50
Figura 7.	Distribuição teórica (Log-Normal) das máximas chuvas diárias anuais de 1961 a 2017 (Recife - Curado).	52
Figura 8.	Chuva e maré por evento extremo no Recife. A) 17/05/2013; B) 19/12/2013; C) 26/06/2014; D) 04/07/2015; E) 16/04/2016; F) 09/05/2016; G) 13/06/2019.	55
Figura 9.	Distribuição percentual dos totais máximos precipitados por fração de duração dos eventos considerados.	56
Figura 10.	Localização da área de estudo.	63
Figura 11.	Modelo Digital do Terreno da bacia do canal Derby-Tacaruna.	65
Figura 12.	Sistema de comportas e bombeamento. A) Extremidade Shopping Tacaruna (Eixo Norte); B) Extremidade Hospital Portugêis (Eixo Sul).	67
Figura 13.	Episódios de transbordamentos do canal Derby-Tacaruna. A) 25/06/2015; B) 02/09/2019.	67
Figura 14.	Macro drenagem e trechos característicos na bacia do canal Derby-Tacaruna.	68
Figura 15.	Imagens dos canais em fevereiro de 2022: (a) Santa Terezinha; (b) Chié; (c) Cohab; (d) Torreão.	70
Figura 16.	Evolução temporal: de Gamboa à canal Derby-Tacaruna.	73
Figura 17.	Processo de transformação de curso d'água natural para consolidação nos extremos do canal Derby-Tacaruna (A - Extremidade Sul; B - Extremidade Norte).	73
Figura 18.	Processo de formação e ocupação do bairro dos Coelhos.	74
Figura 19.	Nível d'água no canal Derby-Tacaruna, próximo ao Parque Amorim, para uma maré de 1,80 m com comportas abertas. A) Antes da dragagem (em agosto de 2008); B) Após a dragagem (em fevereiro de 2012).	75

Figura 20. Fluxograma dos passos metodológicos.	76
Figura 21. Precipitação máxima diária anual observada e simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-hadGEM2-ES e Eta-canESM2 no período de 1961 a 2005.	81
Figura 22. Precipitação máxima diária anual observada e simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM-2-ES e Eta-CanESM2 no período de 2006 a 2017.	82
Figura 23. Comparação das precipitações máximas diárias anuais observadas e simuladas para o período de referência (baseline) e de projeção.	84
Figura 24. Variação de CN com o percentual de área impermeável.	89
Figura 25. Sub-bacias da bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna.	90
Figura 26. Eventos de precipitação intensa analisados.	92
Figura 27. Evento A no canal Derby-Tacaruna. A) Nas proximidades da Praça do Derby, no dia 25/05/2022 às 06h31; B) Nas proximidades do Parque Amorim, no dia 25/05/2021 às 06h32.	93
Figura 28. Instalação das estações de monitoramento: A) Tacaruna; B) Português; C) Canal; D) Porto.	95
Figura 29. Localização das estações pluviográficas e de nível d'água.	96
Figura 30. Equipamento de medição de nível d'água. A) Cabo e sensor; B) Datalogger; C) <i>Software</i> .	96
Figura 31. Levantamento topo altimétrico para instalação dos sensores. A) Estação Total; B) Sistema RTK; C) RN IBGE – Porto do Recife.	97
Figura 32. Modelo de reservatório não linear de uma sub-bacia.	98
Figura 33. Esquema analítico do modelo SWMM.	102
Figura 34. Montagem da bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna no modelo SWMM.	104
Figura 35. Perfil longitudinal do canal Derby- Tacaruna no SWMM.	105
Figura 36. Seções transversais do canal Derby-Tacaruna implantadas no SWMM. A) Imediações do Parque Amorim; B) Av. João de Barros.	106
Figura 37. Gráficos de dispersão com dados anuais de temperatura e precipitação no Recife (1961-2017).	112
Figura 38. Gráfico de dispersão para eventos de dois dias consecutivos com chuvas acima de 30 mm.	119
Figura 39. Distribuição de frequência relativa por intervalo de amplitude de maré. a) Mensal b) Anual.	120

Figura 40. Distribuição anual de frequência relativa das alturas de marés. a) Marés máximas. b) Marés mínimas.	121
Figura 41. Distribuição mensal de frequência relativa das alturas de marés. a) Marés máximas. b) Marés mínimas.	122
Figura 42. Marés previstas pela DNH x marés medidas no Porto do Recife.	123
Figura 43. Comparativo gráfico entre as marés previstas pela DNH e medidas no Porto do Recife. a) No mês de junho de 2021. b) Nos 3 primeiros dias de junho de 2021.	123
Figura 44. Comportamento da maré nos exutórios (Pontos A e B) e no Porto (Ponto D). a) Marés de sizígia. b) Marés de quadratura.	124
Figura 45. Gráficos de calibração e validação: a) Evento A; e b) Evento B.	127
Figura 46. Variação dos níveis d'água observados e simulados no Ponto C, considerando o Evento A.	128
Figura 47. Hietograma representativo projetado para os cenários futuros, considerando o Evento A.	129
Figura 48. Precipitações acumuladas projetadas para os cenários futuros, considerando o Evento A.	129
Figura 49. Níveis d'água simulados no ponto C para os cenários futuros, considerando o Evento A.	130
Figura 50. Perfis hidráulicos com níveis máximos d'água simulados para os cenários C, F1, F2 e F3, a partir do Evento A.	132
Figura 51. Manchas de inundações estimadas para os cenários futuros: F1, F2 e F3, a partir do Evento A.	133
Figura 52. Discretização dos lotes urbanos por sub-bacias.	137
Figura 53. Perfis hidráulicos dos níveis d'água no canal Derby-Tacaruna para a Estratégia 1 e cenários futuros.	143
Figura 54. Nível d'água no Ponto C com o bombeamento no Eixo Norte: a) condição 1; b) condição 2; c) condição 3.	146
Figura 55. Nível d'água no Ponto C com o bombeamento no Eixo Norte e Sul: a) condição 1; b) condição 2; c) condição 3	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Resumo dos possíveis cenários de RCPs.	30
Tabela 2.	Máximas precipitações diárias anuais no Recife – Estação Recife (Curado) (1961 – 2017).	51
Tabela 3.	Tempo de retorno dos eventos de precipitação máxima diária/ano para a cidade do Recife.	53
Tabela 4.	Caracterização dos maiores eventos chuvosos ocorridos nos cinco anos anteriores a 2020 em Recife.	56
Tabela 5.	Caracterização dos bairros parcialmente inseridos na bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna.	64
Tabela 6.	Composição das séries parciais de dados para a estação climatológica Recife-Curado (57 anos).	78
Tabela 7.	Porcentagem de Viés (PBIAS) e Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), para precipitação máxima diária anual simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o período de 1961 a 2005.	81
Tabela 8.	Porcentagem de Viés (PBIAS) e Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), para precipitação máxima diária anual simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o período de 2006 a 2017.	82
Tabela 9.	Porcentuais de aumento para as precipitações máximas de cada horizonte.	85
Tabela 10.	Projeções de aumento médio do nível do mar de acordo com o IPCC.	85
Tabela 11.	Proposta para os cenários climáticos futuros de simulação.	86
Tabela 12.	Caracterização física das sub-áreas de contribuição ao canal Derby-Tacaruna.	89
Tabela 13.	Estações pluviográficas na área de estudo e entorno.	92
Tabela 14.	Caracterização dos eventos chuvosos analisados.	92
Tabela 15.	Descrição das estações de monitoramento de nível d'água.	94
Tabela 16.	Situação do exutório dos tributários do canal Derby-Tacaruna para a condição de NA máximo.	106
Tabela 17.	Intervalos de coeficientes adotados no modelo.	107
Tabela 18.	Síntese das variáveis utilizadas na calibração e validação.	108
Tabela 19.	Análise estatística nas séries temporais de temperaturas mínima, média e máxima (1961-2017).	114

Tabela 20. Análise estatística nas séries temporais de precipitação total e máxima (1961-2017).	116
Tabela 21. Frequência e tendência da ocorrência de dias com precipitações acima de 30 mm.	118
Tabela 22. Percentuais de incremento nos níveis d'água no Ponto C do Derby-Tacaruna frente às mudanças do clima, em comparação com o cenário C.	131
Tabela 23. Novos valores de CN das sub-bacias considerando a TSN dos lotes urbanos.	136
Tabela 24. Percentuais médios de redução dos níveis d'água com a adoção da Estratégia 1 para os cenários F1, F2 e F3.	139
Tabela 25. Resultados reportados pelo módulo hidrológico (runoff) do SWMM com o emprego de TSN nos lotes da bacia.	140
Tabela 26. Volumes de redução para o uso de TSN nos lotes da bacia Derby-Tacaruna, para os cenários simulados.	140
Tabela 27. Discretização dos lotes em termos de volume acumulado por sub-bacia e enquadramento na Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015).	141
Tabela 28. Síntese dos resultados do SWMM com a adoção da Estratégia 2, para diferentes condições simuladas.	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Medidas estruturais adaptativas de engenharia convencional.	41
Quadro 2. Alguns instrumentos de gestão estadual e municipal direcionados à questão das mudanças climáticas e sua relação com a drenagem urbana.	59
Quadro 3. Caracterização da macrodrenagem artificial na bacia do canal Derby-Tacaruna.	69
Quadro 4. Caracterização dos tributários afluentes ao canal Derby-Tacaruna.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
AR	<i>Assessment Reports</i>
BESM	<i>Brazilian Earth System Model</i>
BGI	<i>Blue-Green Infrastructure</i>
CanESM2	<i>Canadian Earth System Model</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CN	Curva Número
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
Condepe/Fidem	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase</i>
CORREL	Coefficiente de Correlação
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
Emlurb	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EMPA	Erro Médio Percentual Absoluto
GCM	<i>General Circulation Model</i>
GEEs	Gases de Efeito Estufa
GI	<i>Green-Infrastructure</i>
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
HadGEM2-ES	<i>Hadley Centre Global Environment Model version 2-Earth System</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center's River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>

LUOS	Lei de Uso e Ocupação do Solo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research On Climate</i>
MODCEL	Modelo de Células de Escoamento
NMM	Nível Médio dos Mares
NSE	Coefficiente de Eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P _{BIAS}	Porcentagem de Viés
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PDDR	Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife
PDU	Plano Diretor Urbano
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
PIB	Produto Interno Bruto
PMBC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCM	<i>Regional Circulation Model</i>
RCP	Representative Concentration Pathway
RF	<i>Radiative Forcing</i>
RMPG	Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia
RMR	Região Metropolitana do Recife
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SDU	Sistema de Drenagem Urbana
SSPs	<i>Shared Socio-economic Pathways</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TSN	Taxa de Solo Natural
ZUP	Zona de Urbanização Preferencial

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	JUSTIFICATIVA	21
1.2.	HIPÓTESE	22
1.3.	OBJETIVOS	23
1.3.1.	Objetivo geral	23
1.3.2.	Objetivos específicos	23
1.4.	ESTRUTURA DA TESE	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.	VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM CIDADES ESTUARINAS E COSTEIRAS	25
2.2.	MUDANÇAS DO CLIMA E A DRENAGEM URBANA	29
2.2.1.	Estimativas climáticas globais e regionalizadas	29
2.2.2.	Efeito das chuvas intensas	32
2.2.3.	Efeito do nível médio das águas do mar	35
2.3.	MEDIDAS PARA ADAPTAÇÃO DE INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA	36
2.4.	RECIFE E A DRENAGEM URBANA: PROBLEMÁTICAS E PECULIARIDADES	44
2.4.1.	Vulnerabilidade climática: situação atual e prevista	46
2.4.2.	Ações de mitigação dos impactos e adaptação da infraestrutura de drenagem local	58
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	63
4.	METODOLOGIA	76
4.1.	ETAPA 1 – ANÁLISE CLIMÁTICA (PROGNÓSTICO)	77
4.1.1.	Tendências em séries temporais hidroclimáticas	77
4.1.2.	Projeções climáticas	79
4.2.	ETAPA 2 – ESTIMATIVA DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS	86
4.3.	ETAPA 3 – VULNERABILIDADE DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA EXISTENTE	86
4.3.1.	Obtenção e tratamento dos dados	87
4.3.2.	Modelagem integrada: SWMM (1D) e ArcGis (2D)	97

4.4.	ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DE MEDIDAS ADAPTATIVAS PARA A INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM	109
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5.1.	DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES HIDROCLIMÁTICAS	111
5.1.1.	Análise exploratória dos dados de temperatura e precipitação	111
5.1.2.	Análise de tendências nas séries temporais de temperatura e precipitação	113
5.1.3.	Análise de tendências na ocorrência de precipitações extremas	117
5.1.4.	Análise exploratória da série temporal de previsões de marés e de medições no Porto do Recife	119
5.2.	ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA BACIA DO CANAL DERBY-TACARUNA ÀS MUDANÇAS DO CLIMA	125
5.3.	SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS ADAPTATIVAS NA BACIA DO CANAL DERBY-TACARUNA	134
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
6.1.	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS E ATUALIZAÇÃO DOS DADOS	150
	REFERÊNCIAS	153
	ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DA MACRODRENAGEM DA BACIA DO CANAL DERBY-TACARUNA	167
	APÊNDICE A – REGISTROS DOS NÍVEIS D'ÁGUA NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	178

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, muitas cidades brasileiras se consolidaram num processo de urbanização acelerado e, quase sempre, não planejado. Sabe-se que tal processo conduz à redução da capacidade de infiltração da água no solo e ao aumento do escoamento superficial das águas pluviais, podendo provocar problemas de alagamentos e inundações urbanas. Aliado a isso, outro fator preocupante e desafiante para os grandes centros urbanos, relaciona-se aos efeitos das alterações climáticas globais. Para David e Cardoso (2012) e Ye *et al.* (2023), esses efeitos em regiões costeiras e/ou estuarinas podem trazer sérias implicações ao desempenho da infraestrutura de drenagem urbana existente, bem como na concepção de novos sistemas (caso o fator “clima em mudança” não seja considerado).

O Quinto e Sexto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da ONU (IPCC¹, em sua sigla em inglês), publicados em 2014 e 2022, afirmam que, num cenário mundial, os riscos climáticos baseados em precipitações extremas e inundações costeiras pela elevação do nível médio do mar - NMM, já são de moderado a alto. Tais eventos, que já se mostram desastrosos nos grandes centros urbanos devido ao uso inadequado do solo e de técnicas pouco eficientes de drenagem, devem ser agravados em cenários de ciclos hidrológicos alterados. Diante disso, discussões sobre os possíveis efeitos das alterações climáticas à infraestrutura de drenagem auxiliam na preparação das cidades para enfrentar os desafios futuros (Miguez *et al.*, 2011; Kirshen *et al.*, 2015; IPCC, 2014, 2022).

Geralmente, os alagamentos nas cidades são atribuídos às falhas nos sistemas de drenagem urbana, seja por erro de concepção, por falta de manutenção, por obsolescência ou pelo crescimento urbano desordenado. No Brasil, as soluções estruturais usadas nem sempre são as mais adequadas e, muitas vezes, se mostram pouco eficientes, dada a alta densidade urbana e a ocupação de zonas ilegais e perigosas, situações estas recorrentes no país inteiro. Com as mudanças do clima, as falhas no sistema também podem ser atribuídas ao agravamento dos eventos de chuva intensa e à restrição imposta pela maré no exutório da rede. Numa possível combinação entre tais variáveis climáticas, a partir dos eventos hidrológicos para o futuro, os efeitos serão refletidos na abrangência espacial dos alagamentos, fazendo-os chegar em locais

¹ Órgão das Nações Unidas para avaliar a ciência relacionada à mudança climática. É formado pela cooperação de dois órgãos da ONU: a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

antes não alagáveis, elevando as cotas de lâmina d'água e os tempos de permanência (Miguez *et al.*, 2011; Macedo, 2017; Andimuthu *et al.* 2019).

Essa situação é mais agravada nas áreas urbanas de planícies costeiras, como na cidade do Recife, que teve seu processo de ocupação de forma desordenada e possui um sistema de drenagem altamente vulnerável às oscilações de maré, podendo provocar sérios problemas de alagamentos em períodos de chuvas intensas combinados com maré alta (Silva Junior; Silva, 2016; Silva Junior; Silva; Cabral, 2017). Segundo o PBMC (2016), as tendências climáticas projetadas até 2100 revelam aumento das temperaturas (máximas e médias) e das chuvas extremas no Recife. Em contrapartida, prevê-se uma redução nos dias úmidos consecutivos e nas precipitações médias durante o verão. No litoral brasileiro, espera-se um aumento de 0,5 a 0,7 metros no NMM até 2100, projeção esta a partir de séries históricas de 1986 a 2005 (IPCC, 2014). A nível global, o IPCC (2022) prevê que o NMM poderá subir entre 60 e 110 centímetros até 2100, considerando um forte aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

As evidências acerca dos riscos climáticos reforçam a importância do engajamento dos atores da sociedade não só para a mitigação dos impactos, mas principalmente, para a necessidade de adaptação. Georgeson *et al.* (2016) e Tamm *et al.* (2023) ressaltam que é necessário acelerar os mecanismos de resiliência nas cidades, principalmente através dos formuladores de políticas públicas, que precisam entender a adaptação atual para planejar de forma abrangente e aplicar recursos de forma eficaz.

Mesmo em necessidade iminente, ações concretas de cunho adaptativo ainda são incipientes em muitas cidades do mundo, principalmente nos países em desenvolvimento. No Brasil, as medidas de adaptação adotadas, em geral, são estruturais como a construção de diques, barragens de contenção de cheias, elevação no nível dos aterros e obras de drenagem. Para a avaliação do desempenho de tais medidas, antes da sua implantação, normalmente faz-se uso de modelos hidrológicos, hidráulicos e hidrodinâmicos visando elaborar cenários e simular eventos hidrológicos (Tamm *et al.*, 2023; Waycarbon, 2019; Marengo *et al.*, 2017; Decina; Brandão, 2016).

Dentro desse contexto, esta pesquisa avaliou possíveis estratégias para a inclusão de medidas de adaptação para a infraestrutura de drenagem urbana em uma bacia urbana na área central do Recife, visando o enfrentamento às mudanças do clima. Para isso, foi realizado um prognóstico baseado na detecção de tendências em séries temporais de variáveis hidroclimáticas (temperatura e precipitação) e nas projeções climáticas do IPCC, regionalizadas para o local por meio dos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Além disso, foram realizados monitoramentos dos níveis d'água em 4 pontos da macrodrenagem da bacia

estudada, com medições a cada 15 minutos, em equipamento (sensor de nível + *datalogger*) durante um ano hidrológico. Tais levantamentos deram subsídios à construção de cenários e permitiu uma análise da vulnerabilidade local, a partir do uso do *software* SWMM (*Storm Water Management Model*), além de verificar a inclusão de medidas de adaptação na infraestrutura de drenagem urbana existente, que possam melhorar a resiliência do sistema no âmbito das mudanças do clima.

1.1. JUSTIFICATIVA

A mudança do clima é um dos desafios mais complexos deste século e, nesta perspectiva, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) aponta a urgência de desenvolver mecanismos institucionais e de ação para promover a adaptação dos ambientes urbanos, direcionando investimento em serviços climáticos e reforçando os sistemas de alerta e de tomada de decisão (Revi *et al.*, 2014; Marengo *et al.*, 2023).

No Brasil, a perspectiva da elevação do NMM afetaria aproximadamente 25% da população, 50 milhões de pessoas, que vivem em cidades costeiras, onde a urbanização se expandiu para áreas baixas e os alagamentos já ocorrem, especialmente quando as chuvas fortes coincidem com marés altas. Nesses locais, a infraestrutura urbana é particularmente vulnerável à ocorrência de falhas estruturais, hidráulicas e ambientais, pois sentirá a pressão da elevação do NMM e a intensificação das chuvas e alagamentos urbanos (WWF-Brasil, 2017; Marengo *et al.*, 2017).

O Recife é a 16ª cidade do mundo mais vulnerável às mudanças climáticas devido às suas características físicas e sociais, à alta densidade populacional do seu litoral, ao elevado índice de impermeabilização do solo e à sua baixa altitude. Dito isto, a cidade já começa a apresentar riscos com aumento do NMM, das chuvas intensas e da temperatura média. Como consequência da subida do NMM até 2100, prevê-se que a capital pernambucana poderá perder 33,7 km² do seu território (Waycarbon, 2019; Recife, 2017; PBMC, 2016; Costa *et al.*, 2010).

A urbanização desenfreada associada com as alterações climáticas, resultantes do aumento da temperatura, da intensidade de chuva e do NMM, deverão reportar sérios impactos aos sistemas de drenagem urbana (SDU), provocando e/ou agravando os alagamentos. Isso porque, uma infraestrutura de drenagem urbana, dimensionada com base nos registros históricos de chuvas, pode ter seu desempenho afetado pelas mudanças climáticas, sendo necessário a adoção de medidas de adaptação, incluindo a melhoria dos sistemas de drenagem existentes (Ye *et al.*, 2023; Zamani *et al.*, 2023; Macedo, 2017; Bai *et al.*, 2015). Ainda nesse

contexto, focando no Recife, Silva Junior e Silva (2016) e Ramos e Azevedo (2010) verificaram que as intensidades de chuva calculadas pelas equações IDF desenvolvidas na década de 80 até anos recentes apresentaram aumento para durações menores (5, 10, 15 e 30 min.). Segundo os autores, as diferenças nas intensidades de chuva se devem, provavelmente, ao período de dados utilizados e a possíveis alterações no regime de chuvas, ambos influenciados pelo efeito das mudanças do clima.

Apesar da necessidade iminente, dada a alta vulnerabilidade do Recife, ações e medidas que propiciem uma melhor adaptação da cidade ainda são muito tímidas e baseadas em iniciativas para a mitigação dos impactos. Silva Junior *et al.* (2020) relatam que, basicamente, os planos, estudos e legislações até então existentes, discutem a temática das mudanças climáticas de maneira superficial sob a ótica da vulnerabilidade da cidade (apresentando projeções climáticas e ações de mitigação), sem estabelecer diretrizes para o desenvolvimento e implantação de ações concretas para a adaptação.

Recentemente, discussões sobre estratégias para adaptação do Recife, frente às mudanças do clima, têm ganhado força no debate de políticas públicas para redução dos riscos climáticos. Apesar disso, a ideia de adaptar a infraestrutura de drenagem visando os cenários climáticos futuros ainda é um grande desafio para o Recife, não só pelas peculiaridades urbanísticas e geográficas que a cidade apresenta, mas também pela dificuldade que a gestão pública enfrenta em tentar solucionar os atuais problemas de drenagem.

No âmbito científico, grande parte dos estudos elaborados para cidades costeiras e estuarinas abordam a relação entre as mudanças do clima e a drenagem urbana no contexto das vulnerabilidades, avaliando, apenas, o impacto das projeções climáticas na infraestrutura existente. Há poucos trabalhos acadêmicos que avaliam o desempenho de medidas adaptativas para sistemas de drenagem nessas localidades, considerando efeito combinado de elevação do NMM e aumento da intensidade de chuvas intensas. Dessa forma, esta pesquisa deverá suprir tal lacuna e poderá servir de referência, também, para gestores municipais no intuito de contribuir no processo de tomada de decisão, na busca de alternativas viáveis para a localidade estudada e outras áreas de características semelhantes.

1.2. HIPÓTESE

As medidas adaptativas implantadas ou previstas para a cidade do Recife-PE, associadas à infraestrutura de drenagem urbana, não são suficientes para neutralizar os efeitos da mudança do clima. Nesse contexto, através da modelagem matemática, é possível definir estratégias que

melhorem a resiliência da infraestrutura de drenagem em área piloto, avaliando o desempenho de medidas adaptativas localizadas, no intuito de contribuir no processo de tomada de decisão.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar estratégias de adaptação e/ou readequação na infraestrutura de drenagem em área de planície urbana, estuarina e costeira do Recife, com foco na bacia do canal Derby-Tacaruna, visando o enfrentamento aos cenários de mudança do clima.

1.3.2. Objetivos específicos

- Apresentar um prognóstico baseado na detecção de tendências em séries temporais hidroclimáticas e nas projeções regionalizadas do IPCC, visando a construção de cenários climáticos;
- Avaliar, com modelagem hidráulico-hidrológica (SWMM), a vulnerabilidade da infraestrutura de drenagem existente, frente aos cenários atuais e futuros preestabelecidos no prognóstico; e
- Simular readequações e/ou medidas adaptativas na infraestrutura de drenagem local, com base nos resultados da modelagem dos cenários futuros de mudança do clima.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Esta Tese foi estruturada em seis capítulos, sendo o primeiro referente à **INTRODUÇÃO**, contemplando a contextualização e problematização da pesquisa; a justificativa para desenvolvimento do tema; a hipótese da Tese; os objetivos (geral e específicos) da pesquisa; e a estruturação da Tese.

O capítulo 2, que aborda a **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**, reúne, no primeiro momento, informações de publicações científicas nacionais e internacionais, considerando: a vulnerabilidade em áreas urbanas estuarinas e costeiras; a relação entre mudanças do clima e a drenagem urbana; e discussões de casos no Brasil e no Mundo com aplicação de medidas de adaptação e/ou readequação de sistemas de drenagem urbana existentes, prevendo a elevação do NMM e o aumento da intensidade das chuvas extremas. No segundo momento, focando no

Recife, foram discutidas: a vulnerabilidade e os principais desafios para a adaptação da drenagem urbana da cidade, destacando os problemas e peculiaridades do sistema local; os efeitos das alterações climáticas na rede; e as ações de mitigação dos impactos e iniciativas de adaptação da infraestrutura de drenagem urbana.

O capítulo 3 aborda a **CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**, apresentando uma análise dos parâmetros físicos da bacia do canal Derby-Tacaruna, com base na evolução do processo de ocupação, situação da infraestrutura de drenagem local e os problemas de alagamentos enfrentados nos períodos de chuva.

O capítulo 4 discute a **METODOLOGIA** empregada para o desenvolvimento desta Tese, que foi dividida em quatro etapas: (1) Análise climática do Recife, baseada na detecção de tendências em séries temporais hidroclimáticas (chuva e temperatura), além das projeções do IPCC e dos modelos climáticos regionalizados; (2) Estimativa de cenários climáticos, considerando as projeções do IPCC para os cenários de elevação do NMM e o modelos de circulação global regionalizados para Recife, na identificação dos aumentos de intensidade da chuva até o horizonte de 2100; (3) Modelagem da vulnerabilidade da infraestrutura de drenagem, diante dos cenários climáticos propostos, detalhando as condições de contorno utilizadas na modelagem computacional, através do SWMM, e definindo os parâmetros e variáveis de entrada do *software*, e (4) Simulação das estratégias adaptativas para a infraestrutura de drenagem existente, no âmbito do modelo hidrológico e hidráulico (SWMM), com vistas à avaliar o emprego de medidas que reduzam a vulnerabilidade climática do local estudado.

No capítulo 5 são apresentados os **RESULTADOS E DISCUSSÃO** com foco na: detecção das tendências hidroclimáticas (chuva e temperatura); análise da vulnerabilidade do atual e futura da bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna, baseada na calibração e validação do SWMM e nas simulações dos cenários climáticos com horizontes temporais de 2040, 2070 e 2100, respectivamente; e análise das simulações, no SWMM, das estratégias elencadas para a readequação da infraestrutura de drenagem existente e adaptação para novas estruturas.

Por fim, no capítulo 6 são feitas as **CONSIDERAÇÕES FINAIS** desta Tese, destacando os resultados obtidos na pesquisa e discutindo as medidas de adaptação que podem ser empregadas na drenagem urbana na área estudada, em cenário de mudança do clima. Também são comentadas as dificuldades encontradas durante a realização desta Tese, indicando as possibilidades para estudos futuros que visem à análise da vulnerabilidade climática do Recife, bem como a avaliação de medidas adaptativas para aumentar a resiliência urbana diante das mudanças do clima.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne informações de publicações nacionais e internacionais acerca da temática abordada. Nesta etapa foram levantados estudos científicos considerando: a vulnerabilidade em áreas urbanas estuarinas e costeiras; a relação entre mudanças do clima e a drenagem urbana; e discussões de casos no Brasil e no Mundo com aplicação de medidas de adaptação e/ou readequação de sistemas de drenagem urbana existentes, prevendo o aumento do NMM e da intensidade das chuvas extremas.

Focando no Recife, será discutida: a vulnerabilidade e os principais desafios para a adaptação da drenagem urbana da cidade, destacando os problemas e peculiaridades do sistema local; os efeitos das alterações climáticas na rede; e as ações de mitigação dos impactos e iniciativas de adaptação da infraestrutura de drenagem urbana. Tal análise, descrita no item 2.4, fruto da pesquisa de doutorado e que compõe a revisão bibliográfica desta Tese, foi publicada integralmente em 2020 (contemplando poucas atualizações nesta versão) no “*Journal of Environmental Analysis and Progress*”, no artigo com título “Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE”, visando o atendimento aos requisitos de publicação do PPGECC-UFPE para a obtenção do título de doutor.

2.1. VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM CIDADES ESTUARINAS E COSTEIRAS

A vulnerabilidade climática é o grau de suscetibilidade ou incapacidade do sistema responder aos efeitos adversos da mudança do clima, incluindo a variabilidade e os extremos climáticos (IPCC, 2012). O seu conhecimento pode aperfeiçoar a tomada de decisão e orientar a gestão em áreas suscetíveis a inundações, extremos de chuva e temperatura, entre outros.

As cidades estuarinas e costeiras caracterizam-se pela localização instável, devido à coincidência de efeitos dos rios circundantes e galgamento marítimo; são vulneráveis a inundações, devido ao fato de se localizarem em zonas de pequena elevação (IPCC, 2014). São também, em regra, cidades com alto poder econômico e densidade populacional elevada, o que aumenta a impermeabilização do solo. Nesses locais, os riscos e prejuízos provocados por alterações climáticas são elevados (PBMC, 2016; Zevenbergen *et al.*, 2016; Macedo, 2017).

A maioria das megacidades do mundo está localizada em zonas costeiras (Brown *et al.*, 2013) e boa parte delas estão situadas em regiões estuarinas (Seto, 2011), onde as combinações de condições econômicas, geográficas e históricas específicas até hoje atraem as pessoas e impulsionam a migração costeira. IPCC (2014) revela que 65% das cidades do mundo, com

população acima de 5 milhões de habitantes, localizam-se em zonas costeiras de baixa elevação (< 10 m). O estudo de Neumann *et al.* (2015) mostra que 10,9% da população mundial (ano-base 2000) se concentrava nessas áreas, com uma densidade populacional média cinco vezes superior à média global. Ainda segundo o estudo, em 2060 estima-se que 12% da população mundial se concentre nessas localidades.

Para Gasper, Blohm e Ruth (2011) e PMBC (2016), o crescimento urbano desordenado e excessivo provoca alterações no microclima e pode agravar os efeitos dos eventos extremos. Tais eventos, que nas cidades incluem ondas de calor, secas, chuvas intensas e inundações costeiras, têm sofrido aumento em frequência e magnitude num cenário de clima em mudança (IPCC, 2022). Para IPCC (2014), há evidências de que a mudança climática já modificou a magnitude e a frequência de eventos extremos meteorológicos em algumas regiões globais, embora ainda seja difícil atribuir eventos individuais às alterações do clima.

Vários pesquisadores do mundo destacam a elevação do NMM como o efeito mais relevante das mudanças do clima (PBMC, 2016). O nível global do mar tem crescido ao longo dos séculos XX e XXI (IPCC, 2013; Burbidge, 2011), e embora haja um desacordo sobre a taxa de crescimento diante dos diferentes cenários de emissões de gases do efeito estufa, esse aumento está quase certo de acelerar durante o restante do século XXI (Church; White, 2011). Cidades estuarinas e costeiras em ambientes geográficos de baixa elevação são especialmente vulneráveis aos perigos de tais aumentos. Apesar do efeito do aumento do NMM ser diverso, a inundação no pico de maré é a consequência mais evidente e imediata (Figura 1).

Figura 1. Alagamentos de maré alta. a) Joinville/SC (BRA); b) Santos/SP (BRA); c) Veneza (ITA); d) Miami (EUA).



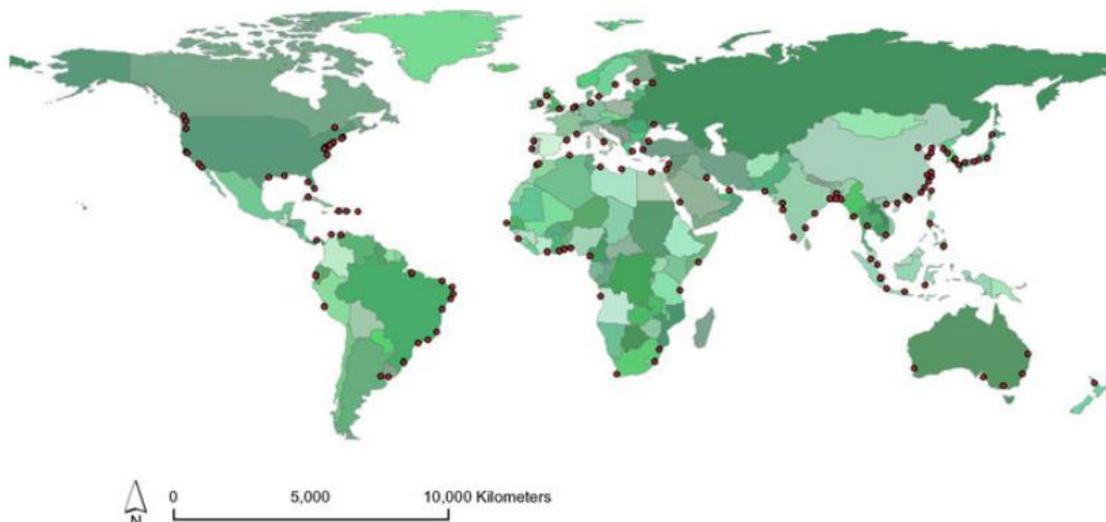
Fonte: NDMAIS (2011); BOQNEWS (2016); UOL (2018); WIKIMEDIA (2016).

Huong e Pathirana (2013) avaliaram, a partir do modelo 1D/2D acoplado (SWMM-Brezo), os efeitos das mudanças climáticas na drenagem da cidade de Can Tho (região estuarina do Rio Mekong, Vietnã), simulando cenários para 2100 de: elevação do nível do mar; aumento no escoamento do Rio Mekong; aumento no escoamento em áreas urbanas a partir da impermeabilização; e mudanças no regime de chuvas extremas. A partir da combinação dos cenários, os autores constataram que a pior situação ocorrerá com o aumento de 1 m no nível do mar, alertando para a necessidade de adaptação da infraestrutura de drenagem da cidade.

Miguéz *et al.* (2011) avaliaram a vulnerabilidade da infraestrutura de drenagem de duas bacias urbanas do Rio de Janeiro aos efeitos das mudanças climáticas. Na cidade, a maior parte da ocupação urbana se concentra em planícies costeiras, com alta vulnerabilidade à inundação em cenário de clima em mudança. Os autores simularam, utilizando o ModCEL e HIDRO-FLU, a combinação de cenários críticos de elevação do nível do mar (+1,50 m) e aumento da intensidade de chuvas extremas. Como resultado, observaram alagamentos de 1,50 m provocados pelo aumento da intensidade das chuvas, e inundações > 1,0 m nas regiões próximas do exutório, com restrição de descarga imposta pela maré.

De acordo com o levantamento de Hanson *et al.* (2011), 136 cidades do mundo (com mais de 1 milhão de habitantes) possuem altos índices de vulnerabilidade climática, no que concerne ao aumento do NMM, sendo que dez estão no Brasil, das quais cinco concentradas na região Nordeste (Figura 2). Do total de cidades vulneráveis, 37 possuem território parcial e/ou totalmente inserido em ambientes deltaicos/estuarinos. Para Priori Junior (2013), os países com maiores extensões de áreas costeiras desenvolvidas e fortemente urbanas como os Estados Unidos, China e Brasil, são os que apresentam maiores exposições aos riscos climáticos.

Figura 2. Cidades com mais de 1 milhão de hab., em sua área metropolitana, mais vulneráveis ao aumento do NMM.



Fonte: Hanson *et al.* (2011).

Blankspoor, Dasgupta e Laplante (2014) quantificaram o impacto do aumento do nível do mar de 1 m sobre as áreas costeiras de 86 países e territórios em desenvolvimento. Os autores concluíram que, aproximadamente, 68% das regiões costeiras desses países estão em risco. Grande porcentagem dessa perda estimada está na China e Vietnã (Leste da Ásia e Pacífico), Líbia e Egito (Oriente Médio e Norte da África), e Romênia e Ucrânia (Europa e Ásia Central).

Adams *et al.* (2014) mostram que todas as áreas costeiras do mundo são vulneráveis à elevação do NMM. Dependendo da cidade, o NMM pode aumentar entre 0,34–0,39 m para um aquecimento global de 1,5°C e de 0,56–0,64 m com um aquecimento global de 4°C. Os autores estimam que, até o ano de 2050, inundações de áreas costeiras pela elevação do NMM de 0,20 m podem gerar prejuízos econômicos anuais de US\$ 940 milhões nas 22 maiores cidades costeiras da América Latina e Caribe, enquanto a elevação do NMM em 0,40 m terá perda econômica anual de até US\$ 1,2 bilhões.

No Brasil, o aumento do nível do mar poderá afetar cerca de 25% da população, 50 milhões de pessoas, que vivem em cidades costeiras, onde a urbanização se expandiu para áreas baixas e os alagamentos já ocorrem, especialmente quando as chuvas fortes coincidem com marés altas. Quatro de suas dez cidades mais populosas são costeiras: Rio de Janeiro, Salvador, Fortaleza e Recife. Juntas, detém 7% da população brasileira e 8% do PIB nacional (Marengo *et al.*, 2017; IBGE, 2016a).

Numa análise global, para cidades costeiras com mais de um milhão de habitantes, é esperado que a população exposta aos eventos extremos do nível do mar aumente em 50% até 2070 (IPCC, 2014). Segundo Hinkel *et al.* (2013), o uso de medidas de adaptação (proteção costeira) pode reduzir substancialmente este risco. Os autores estimam que sem proteção, 172 a 262 milhões de habitantes precisarão ser deslocados em 2100, considerando uma elevação média do nível do mar entre 0,6 a 1,3 m. Em contrapartida, com aumento da quantidade de proteções (como diques), estes números (de habitantes) podem reduzir duas ordens de grandeza.

Nos estudos de vulnerabilidade climática, geralmente são usados projeções e diagnósticos do IPCC, que desenvolveu, desde 1990, seis relatórios de avaliação - *Assessment Reports*, AR (em: 1990, 1995, 2001, 2007, 2014 e 2022) mostrando as causas, os efeitos e as medidas de mitigação e adaptação para cenários do clima em mudança. Os cenários climáticos do AR5 e AR6 (IPCC, 2014, 2022) tem como base um sistema de previsão mais completo, quando comparados com os relatórios anteriores, pois considera os impactos das emissões dos gases do efeito estufa (GEE), ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação do sistema terrestre. Assim, é possível projetar, numa escala temporal (até 2100) e local, as

temperaturas, precipitações e níveis de maré, em diferentes condições de emissões, para avaliar os impactos e identificar as vulnerabilidades em ambientes urbanos estuarinos e costeiros.

Em 2016, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) publicou um relatório que avalia os impactos, a vulnerabilidade e as alternativas de adaptação infraestrutural para cidades costeiras brasileiras frente às mudanças climáticas. Neste relatório, foram realizados estudos de casos em 6 cidades costeiras: Fortaleza, Recife, Salvador, Rio de Janeiro, Santos e Vale do Itajaí. O documento ressalta que as tendências na magnitude e frequência dos eventos ainda não são totalmente precisas devido à qualidade dos registros e ausência de padrão nas medições atmosféricas, o que dificulta, por exemplo a análise temporal do NMM no território nacional.

2.2. MUDANÇAS DO CLIMA E A DRENAGEM URBANA

2.2.1. Estimativas climáticas globais e regionalizadas

O IPCC define o termo “mudanças climáticas” como uma certa alteração no clima, podendo ser identificado por mudanças na média e/ou variação das suas propriedades, e que persiste por um período prolongado de tempo, normalmente por décadas. São causadas pelos processos naturais do próprio planeta ou forças externas, ou pelas ações antrópicas que podem modificar a composição da atmosfera ou do uso do solo (UNISDR, 2009; IPCC, 2014). Num cenário de clima em mudança, os aumentos dos totais precipitados, bem como das intensidades, ocasionarão fortes impactos aos sistemas de drenagem urbana existente. Em muitas localidades, em decorrência do aumento da temperatura média, a atmosfera terá capacidade reduzida de reter água, possibilitando a ocorrência de chuvas mais intensas (Sabóia *et al.*, 2017).

Sabe-se que mudanças nas concentrações dos gases promotores do efeito estufa (Dióxido de Carbono - CO₂, Metano - CH₄, Óxido Nitroso - N₂O, e Halocarbonos), alterações na radiação solar incidente na Terra e na ocupação do solo podem alterar o equilíbrio do sistema climático terrestre. Tais perturbações são mensuradas pela forçante radioativa (*Radiative Forcing* - RF), que é medida em W/m². Essa variável quantifica as mudanças no fluxo de energia terrestre causadas pelos agentes promotores das mudanças climáticas, onde os valores positivos remetem a um possível aquecimento da superfície terrestre, enquanto os valores negativos indicam um resfriamento (Sabóia *et al.*, 2017; IPCC, 2007, 2014, 2022).

Com o intuito de entender as mudanças climáticas que ocorrerão no futuro, foram criados os possíveis cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*). Os RCPs

formam um conjunto de vias de concentração e emissão de gases do efeito de estufa, concebidas para apoiar a investigação sobre os impactos e potenciais respostas políticas às alterações climáticas (Kang *et al.*, 2016). São categorizados em quatro cenários diferentes com base no grau de redução de dióxido de carbono: RCP 2,6; RCP 4,5; RCP 6,0 e RCP 8,5 (Tabela 1). O número associado ao RCP é o valor da RF.

Tabela 1. Resumo dos possíveis cenários de RCPs.

Cenário	Descrição	Concentração equivalente de CO ₂
RCP 8,5 / Pessimista	Crescimento da RF até 8,5 W/m ² até 2100	1370 ppm
RCP 6,0 / Intermediário	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 6 W/m ²	850 ppm
RCP 4,5 / Intermediário	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 4,5 W/m ²	650 ppm
RCP 2,6 / Otimista	Antes de 2100, ocorre o pico da RF de 3 W/m ² . Então, ocorre o declínio, até a estabilização de 2,6 W/m ² em 2100.	490 ppm

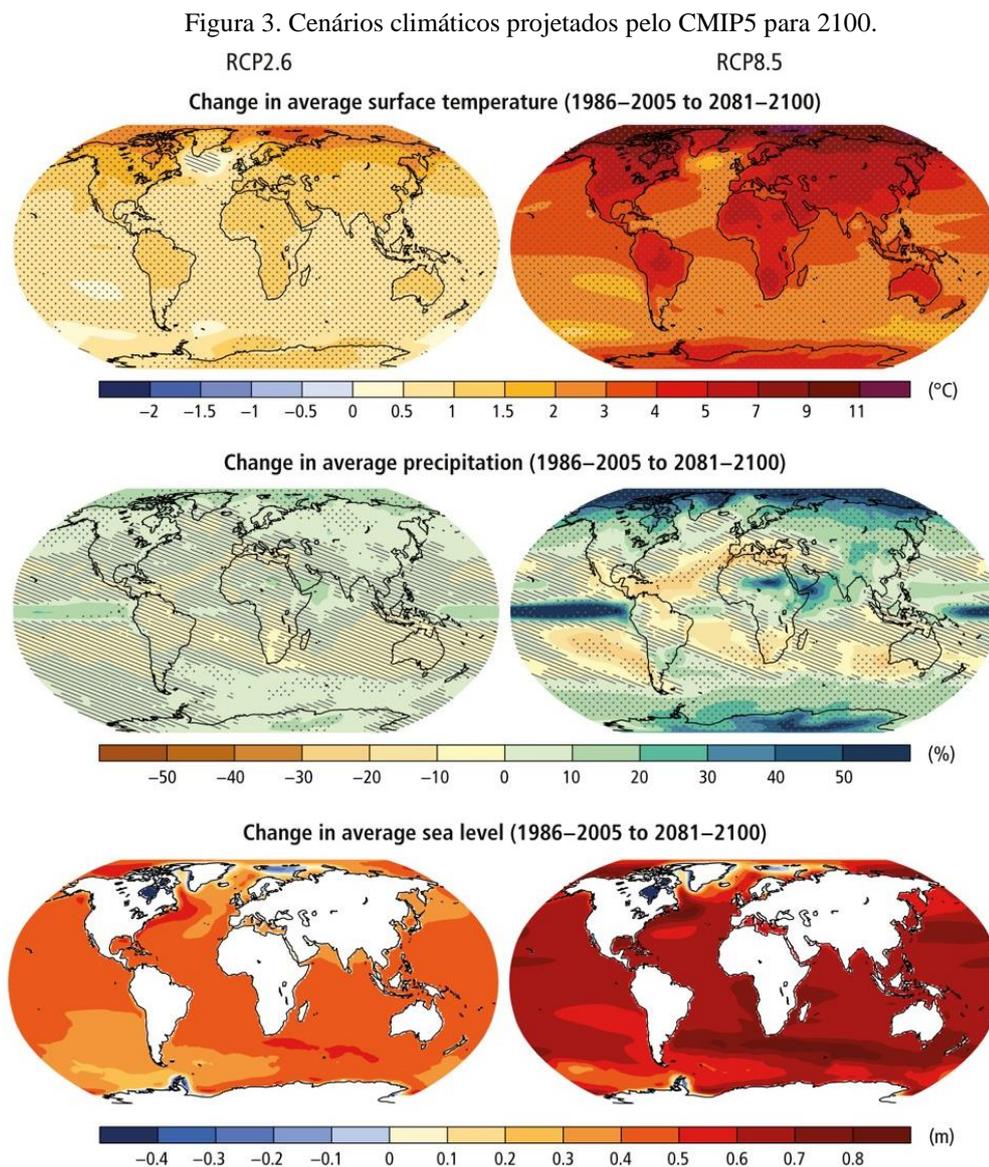
Fonte: Vuuren *et al.* (2011); IPCC (2014).

O RCP 8,5 corresponde a um cenário de alta emissão de gases de efeito estufa, em comparação aos outros cenários (RCPs 2,6; 4,5; 6,0). Nesse cenário, emissões e concentrações de gases do efeito de estufa aumentam consideravelmente ao longo do tempo, levando a forçante radiativa de 8,5 W/m² até 2100, prevendo uma elevação média global do mar de 0,97 m, a partir da *baseline* de 1986 a 2005. Em contrapartida, o RCP 2,6 caracteriza a situação mais otimista, considerando a adoção de políticas ambientais mais restritivas/rigorosas para reduzir a emissão de poluentes (IPCC, 2014). As mudanças nos cenários RCPs podem afetar fortemente a temperatura, o regime de chuvas e o nível do mar em todo o planeta, conforme observado na Figura 3.

Diferente do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase*) que usa os RCPs como cenários de emissão de carbono, o CMIP6 é um conjunto de modelos climáticos globais que utiliza os *Shared Socio-economic Pathways* (SSPs) para projetar cenários futuros. Os SSPs são cenários de desenvolvimento socioeconômico projetados para o futuro, e incluem variáveis sociais, econômicas e bioecológicas, com o aumento da população. Os cenários do CMIP6 incluem SSP1-2,6, SSP2-4,5, SSP4-6,0 e SSP5-8,5. O SSP3-7,0 é um cenário que fica no meio da faixa de resultados de emissão de carbono. O SSP5-8,5 é o cenário do pior caso, enquanto que o SSP4-6,0 é um cenário mais otimista.

Atualmente, os Modelos de Circulação Global (*General Circulation Model – GCM*) são importantes ferramentas disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento das concentrações dos gases responsáveis pelo efeito estufa (IPCC, 2007). Os GCMs

são capazes de modelar numericamente os processos físicos da atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre (Sabóia, 2016). Existe um grande número de GCMs, fornecidos por vários centros de pesquisa ao redor do mundo, com diversos níveis de precisão em função da resolução espacial. Para exemplificar, citam-se alguns dos principais modelos GCMs existentes: HadGEM2-ES → Reino Unido (Collins *et al.* 2011); MIROC5 → Japão (Watanabe *et al.*, 2010); CanESM2 → Canadá (Arora *et al.*, 2011); BESM → Brasil (Nobre *et al.*, 2013); e outros.



Para análises de processos localizados, que exijam maior resolução numa área limitada, são utilizados os Modelos Climáticos Regionais (*Regional Circulation Model - RCM*). Tratam-se de modelos numéricos que resolvem processos físicos em escalas reduzidas, com resoluções horizontais da ordem de dezenas de quilômetros. A redução de escala (*downscaling*) a partir

dos GCMs, permite extrair informações mais detalhadas para os estudos de vulnerabilidade, impactos e adaptação. No Brasil, o modelo regional Eta (Mesinger *et al.*, 2012) vem sendo aplicado pelo CPTEC-INPE para a previsão do tempo e estudos sobre cenários exploratórios e futuros de alterações climáticas, a partir de diferentes escalas de tempo e resoluções espaciais de 5 e 20 km (De Jong *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018).

Outra forma de detectar mudanças climáticas numa escala local ou regional, é através de análise de tendências em séries históricas de variáveis meteorológicas, como temperatura e precipitação. Para isso, são necessários registros climáticos de qualidade e a longo prazo (Souza; Azevedo, 2012). Tais tendências climáticas normalmente são obtidas a partir de métodos estatísticos, com a aplicação de testes paramétricos e não paramétricos. Vários pesquisadores brasileiros têm empregado tal método para identificar tendências em séries temporais de temperatura e precipitação, além de avaliar a sua significância estatística (Pinheiro; Graciano; Severo, 2013; Wanderley; Justino; Sedyama, 2016; Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016; Rocha *et al.*, 2017; Mesquita *et al.*, 2017; Nunes; Pinto; Baptista, 2018; Silva Junior; Fonseca Neto; Cabral, 2020).

Além dos métodos estatísticos, o uso de *softwares* para identificação de tendências climáticas também é bastante comum e, dentre os quais, se destaca o RCLimdex. Algumas pesquisas no intuito de detectar tendências em séries de variáveis climatológicas (temperatura e precipitação) em localidades do Estado de Pernambuco (Recife e outras cidades) já empregaram o citado *software*, o qual é utilizado, basicamente, para o processamento de dados e obtenção dos índices climáticos (Souza; Azevedo, 2009; Souza; Azevedo, 2012; Silva; Montenegro; Souza, 2017).

2.2.2. Efeito das chuvas intensas

Os aumentos na intensidade e frequência de eventos extremos de chuva, em todo o mundo, são consequências das mudanças do clima. Tal constatação é respaldada pelas projeções dos modelos climáticos, que atribuem esse efeito ao aquecimento global provocado pelo aumento das emissões e concentrações de gases de efeito estufa (GEEs). Estudos realizados em locais específicos, comparando projeções em escala regional e dados observados, constataram variações no padrão de chuvas mais intensas, mostrando que o aumento da precipitação extrema já é uma realidade em certos lugares ou regiões (Moura; Pellegrino; Martins, 2015; IPCC, 2007)

Apesar das incertezas quanto à magnitude e às variações regionais das mudanças climáticas, algumas cidades e regiões avaliaram os possíveis efeitos de chuvas mais intensas

em seus sistemas de drenagem urbana. Mesmo com uma quantificação imprecisa do esperado aumento nos eventos de precipitação (Miguez *et al.*, 2011), um dos estudos pioneiros neste campo simulou as implicações nas infraestruturas de drenagem, atribuindo diferentes porcentagens para a intensificação das chuvas: 10%, 20% e 30% (Niemczynowicz, 1989 *apud* Moura; Pellegrino; Martins, 2015).

Num cenário de clima alterado, vários pesquisadores ressaltam a importância do planejamento urbano de longo prazo, a fim de evitar mais problemas relacionados com a drenagem, diante de efeitos dos eventos de chuvas ainda mais intensas (Tamm *et al.*, 2023; Ye *et al.*, 2023). Moura, Pellegrino e Martins (2015) especificam que o citado planejamento, visto como chave estratégica, deverá atentar para as seguintes questões:

- Áreas mais impermeáveis nas cidades associadas ao crescimento urbano devem aumentar tanto os riscos de inundações quanto os efeitos ambientais sobre rios e córregos, que são o destino final do escoamento;
- Os custos de adaptação da infraestrutura de drenagem a chuvas mais intensas e frequentes são altos quando se expande essa rede por meio de técnicas convencionais;
- O uso de tubos de maior diâmetro para suportar maior escoamento pode reduzir a velocidade durante períodos de estiagem e, assim, causar problemas de acumulação de sedimentos; e
- Se a intensidade e a frequência de chuvas fortes continuarem a aumentar, então a expansão dos sistemas de drenagem pode exigir novas intervenções, gerando mais despesas e redesenho.

Em estudos mais recentes sobre vulnerabilidade da infraestrutura de drenagem em cenário de mudança do clima, os pesquisadores tem utilizado diferentes métodos de estimativa percentual para o aumento nas intensidades de chuvas máximas. Alguns métodos baseados em estudos estatísticos, aplicados a séries históricas registradas, e outros em projeções dos modelos climáticos regionalizados, gerando, com esses dados simulados, curvas IDF projetadas para o futuro.

Hassan, Nile e Al-Masody (2017) avaliaram o impacto da mudança no regime das chuvas no sistema de drenagem urbana do bairro de Al-Eskari, em Karbala (Iraque, no Oriente Médio), usando dados contínuos de intensidade de precipitação de 2008 a 2016 e o modelo SWMM. Os autores constataram que, devido às mudanças climáticas nos últimos anos, a intensidade da chuva aumentou para 33,54 mm/h e comprometeu 47% da rede de microdrenagem, que foi projetada para intensidade de chuva de 9,6 mm/h em 60 min. (TR=2 anos).

Silva Júnior e Silva (2016) fizeram uma análise similar e expedita para o bairro da Soledade, no Recife-PE, avaliando as intensidades de chuvas calculadas por equações IDF geradas nos anos de 1979, 1985, 2010, 2013 e 2016, e os impactos na rede de microdrenagem. Os autores observaram aumento na ordem de 40% na intensidade das chuvas de 60 min. (TR=2 anos), resultando em incrementos de vazão de 33% e sobrecarregando 18% da rede de microdrenagem local.

Em Hiawatha, no estado de Minnesota (EUA), Moore *et al.* (2016) constataram, através de simulações no SWMM, que um incremento de 38% na chuva de projeto sobrecarregaria 14% da rede de tubos existente, dimensionada para precipitações de TR=10 anos (104 mm; 24 h) e TR=2 anos.

Sabóia *et al.* (2017) avaliaram o impacto das mudanças climáticas no sistema de drenagem de uma sub-bacia urbana de 3,5 km², em Fortaleza (CE). Os autores utilizaram dados de precipitações de modelos de circulação global, extraídos e interpolados para o local, para elaborar equações IDF projetadas para o futuro. A partir da modelagem hidrológica do HEC-HMS, os resultados revelaram que haverá grandes aumentos nas vazões do exutório do sistema de drenagem da área, com média de 64,13% para o cenário RCP 4,5 e 96,49% para o cenário RCP 8,5. Os custos para execução de uma nova rede de drenagem, considerando o cenário mais pessimista, poderão chegar a R\$ 11.464.588,12.

Andimuthu *et al.* (2019) elaboraram curvas IDF para a cidade de Velachery, na costa da Índia, utilizando dados de precipitação observada (1975-2015) e projetada por quatro modelos de circulação global no cenário RCP 4,5 (2015-2085). A comparação das curvas IDF, geradas para cinco diferentes durações (1h, 2h, 6h, 12h e 24h) e cinco períodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 50, 100 anos, mostraram que, em cenário de mudança do clima, haverá aumento médio de 12% na intensidade das chuvas com TR=2 anos e acréscimo médio de 87% na intensidade das chuvas de TR=100 anos. Tal incremento resultaria numa sobrecarga de 5% e 9% da rede de condutos, para TR de 2 e 100 anos respectivamente.

Para a cidade de São Paulo, Schardong, Srivastav e Simonovic (2014) elaboram equações IDF projetadas para o futuro, a partir dos dados do modelo CanESM2 para os cenários RCP 2,6, RCP 4,5 e RCP 8,5. Quando comparadas às chuvas calculadas pela equação IDF usada pela prefeitura da cidade, os autores observaram incrementos de, aproximadamente, 4,5% (para períodos de retorno menores) e RCP 2,6, e mais de 30% para períodos de retorno maiores (100 anos) no RCP 8,5.

2.2.3. Efeito do nível médio das águas do mar

Em áreas costeiras e estuarinas, o comportamento do nível do mar em relação aos sistemas de drenagem urbana é fator determinante para o eficiente desempenho durante os eventos extremos de precipitação combinados com maré alta. Nesses locais, durante as preamares, haverá uma diminuição na diferença de altitude entre a área a ser drenada e o local para onde a água irá fluir, deixando o sistema mais lento, sobretudo, nos locais onde a drenagem for feita por gravidade (Silva Júnior; Silva, 2014). Além desse fato, os efeitos da elevação do NMM deixarão o sistema mais vulnerável à ocorrência de falhas estruturais, hidráulicas e ambientais, comprometendo a vida útil das estruturas, estipulada em projeto.

Outro problema que seria agravado com a elevação do NMM está relacionado à presença de lençol freático aflorante. Nas regiões costeira e estuarinas, os lençóis freáticos estão bem próximos à superfície do terreno, e com a elevação do NMM, poderia saturar rapidamente o solo e fazer com que o lençol aflorasse na superfície, provocando o surgimento de grandes áreas cobertas com água (áreas alagadas) ou com água a poucos centímetros de profundidade. Tal situação diminui a capacidade de infiltração da água, aumenta o escoamento superficial e compromete seriamente a drenagem local.

Dados globais do IPCC revelam que, entre 1901-2010, o nível médio global do mar subiu 0,19 m. Estima-se que a taxa média global de aumento do nível do mar tenha sido de 1,7 mm/ano entre 1901 e 2010 e de 3,2 mm/ano entre 1993 e 2010 (Church *et al.*, 2013; IPCC, 2014). No Brasil, a Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia (RMPG) do IBGE, identificou para os últimos anos uma subida de 2,1 mm/ano na costa do Nordeste do País (entre Fortaleza/CE e Recife/PE), podendo estimar uma elevação do NNM de 17,64 cm até 2100 (IBGE, 2016b; Aguiar *et al.*, 2018).

Fraile-Jurado *et al.* (2017) aplicaram um método probabilístico para riscos de inundação devido ao aumento do nível dos mares para a costa de El Puerto de Santa María, na província de Cádiz, no sudoeste da Espanha. Os resultados mostraram que não se espera que uma grande área seja exposta à inundação, independentemente do cenário usado devido à sua posição elevada. No entanto, as áreas baixas que cercam a região possuem uma alta probabilidade de inundação durante a maré alta, o que poderia dificultar as comunicações por terra e isolar espaços habitados.

Mendonça e Silva (2008) avaliaram o impacto da subida do nível do mar na cidade do Rio de Janeiro (RJ), utilizando modelos digitais do terreno e cenários de elevação (0,60, 0,80 e 1,50 m). Os autores verificaram que, aproximadamente, 7% da população carioca reside em

áreas passíveis de alagamento, na hipótese de elevação de 1,50 m. A maior vulnerabilidade foi observada nas áreas costeiras das regiões da Barra da Tijuca, Ilha do Governador, Maré, Penha, Guaratiba e Santa Cruz.

Braun e Aumond (2017) mapearam áreas que deverão ser atingidas pela elevação do nível do mar em Joinville (SC), a partir das projeções climáticas do IPCC. A cidade foi concebida em área de planície costeira e estuarina, susceptível às oscilações de maré que ocasionam remanso e alagamentos. Os autores constataram que para o cenário mais crítico (+0,82 m), no horizonte de 2100, 20 dos 43 bairros da área urbana seriam atingidos direta ou indiretamente.

2.3. MEDIDAS PARA ADAPTAÇÃO DE INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA

No mundo, os desastres provocados por inundações entre 2013 e 2018 acarretaram perdas econômicas globais de US\$ 211 bilhões. Na América do Sul, neste mesmo período, o prejuízo econômico foi de aproximadamente US\$ 11,2 bilhões (MUNICH RE, 2018). No Brasil, Haddad e Teixeira (2015) revelaram que os 749 pontos de alagamento identificados em São Paulo (capital), no ano de 2008, geraram um prejuízo de R\$ 250 milhões em termos de Produto Interno Bruto (PIB) do município. Fazendo uma projeção para 2013, mantendo os pontos de alagamento, os autores calcularam uma perda de R\$ 336 milhões, só para o município. Ainda segundo os autores, o Produto Interno Bruto (PIB) Nacional deixou de acumular, por interrupções das cadeias produtivas de empresas paulistanas devido aos alagamentos, em 2008, R\$ 560 milhões, e em 2013, R\$ 762 milhões.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2016) estima que os países da América Latina precisarão investir entre US\$ 140 bilhões e US\$ 300 bilhões, até 2030, e de US\$ 280 bilhões a US\$ 500 bilhões, até 2050, para se adaptarem à mudança do clima.

Adaptação é conceituado como o ajuste nos sistemas naturais ou humanos em resposta aos estímulos, ou seus efeitos, e que moderam danos ou exploram oportunidades (IPCC, 2007). Pode ser do tipo: física (com tecnologias e obras de engenharia, e áreas construídas); social (com medidas para educação, informação, disseminação de conhecimento e mudança de comportamento); e institucional (com medidas econômicas, leis, regulamentos, políticas e programas governamentais).

Capacidade de adaptação ou adaptativa é a aptidão de pessoas, instituições, organizações e sistemas de tratar, gerenciar e superar condições adversas no curto ou médio prazo, utilizando habilidades e recursos disponíveis no momento em que ocorre o evento. Para isto, é necessário que sejam traçadas estratégias de adaptação, a partir de políticas públicas, que vise moderar, evitar danos ou explorar oportunidades benéficas em face a um real ou esperado evento climático (IPCC, 2014)

Na formulação de políticas, a adaptação deve ser vista em três níveis, cujas respostas se interligam com as prioridades de desenvolvimento dos países (IPCC, 2007; Macedo, 2017):

- Adaptação à variabilidade atual - evidência direta e alguns dos efeitos adversos envolvidos; pode reforçar a resiliência das sociedades, permitindo-lhes lidar com outras consequências das alterações climáticas.
- Adaptação em médio prazo e observação das tendências climáticas de longo prazo - dada a evidência crescente de tendências de longo prazo nos padrões do clima.
- Planejamento antecipado em resposta aos cenários prospectivos da mudança climática em longo prazo - investimentos de rotina e decisões de infraestrutura que deixam uma pegada de várias décadas ou mais e podem, portanto, necessitar incorporar cenários de mudanças climáticas futuras.

Uma política de adaptação às mudanças climáticas que seja completa deve conter medidas relacionadas aos três níveis de ação e sempre trabalhará com um certo grau de incerteza. A incerteza relacionada à ciência do clima e às projeções climáticas tem forte influência sobre as análises econômicas e a formulação de políticas (Kirshen *et al.*, 2015). Para Carvalho e Furtado (2015) as decisões de ação estarão sujeitas a dois tipos de risco: o de fazer nada e futuramente deparar-se com um impacto não previsto; o de decidir por uma ação preventiva que se mostre desnecessária no futuro.

Essa incerteza é crítica para a tomada de decisão em nível local, principalmente em países subdesenvolvidos. No Brasil, por exemplo, a necessidade de adaptação não só é considerada de longo prazo como se apresenta de forma inexata por causa da indeterminação e da falta de informações específicas de mudanças do clima em esfera regional. Kirshen *et al.* (2015) explica que uma maneira de iniciar a agenda de adaptação sem ficar completamente refém das incertezas e dos riscos é implantar as ações “sem arrependimento”, que são viáveis mesmo na ausência da mudança do clima e de custo relativamente baixo em comparação aos benefícios de seus resultados esperados.

A inércia do sistema climático torna urgente medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Como já visto, os efeitos do clima em mudança já têm sido sentidos em

diversas partes do globo, inclusive no Brasil. A pressão internacional para a implementação de medidas de adaptação é menor que a pressão para a mitigação, uma vez que, no primeiro caso, os efeitos das mudanças climáticas são localizados. Assim, cada país ou região deve traçar, individualmente, o planejamento e a implementação de estratégias de adaptação e, da mesma forma, o monitoramento e avaliação das medidas implementadas devem ser contínuos e levar a ajustes nas ações em andamento de acordo com os avanços científicos na área de mudanças climáticas (Carvalho; Furtado, 2015).

Com a necessidade de se adaptar ao cenário futuro, as cidades têm a oportunidade de realizar uma transição infraestrutural ao adotar as melhores práticas de gestão de águas pluviais, empregando soluções sustentáveis, resilientes e amigáveis à paisagem urbana (Babovic; Mijic; Madani, 2018). Nas cidades estuarinas e costeiras, os sistemas de drenagem urbana vulneráveis ao efeito combinado de precipitação e maré estão sujeitos, simultaneamente, às solicitações provenientes de montante (escoamento superficial da bacia) e de jusante (fluxo de maré). Nesses casos, é importante que o planejamento da sua adaptação não se atenha apenas ao sistema da rede de drenagem, mas também que incluam diferentes combinações de medidas e tecnologias com potencial uso ao longo de toda a bacia.

O sexto relatório do IPCC (2022) apresenta opções/soluções de adaptação urbana visando o desenvolvimento resiliente das cidades em relação ao clima. Tais soluções foram agrupadas em três categorias: 1. Cinza/infraestrutura física (uso de diques; armazenamento de água; uso de águas cinzas; modernização de infraestrutura de água e saneamento; regulamentos de design e construção urbana); 2. Soluções baseadas na natureza - SBN (uso de telhados verdes; jardins de chuva; biovalas; tanques de retenção); e 3. Planejamento e política social (através do ordenamento do território; gestão de riscos de emergência e desastres; educação climática). Ainda segundo o IPCC (2022), as soluções baseadas na natureza e na política social, como domínios inovadores de adaptação, mostram como algumas das limitações da infraestrutura cinza podem ser mediadas. Assim, a mistura das três categorias tem um alcance futuro considerável nas estratégias de adaptação e na construção de resiliência climática nas cidades e povoações.

Para Rodrigues *et al.* (2023), as soluções baseadas na natureza (SBN) proporcionam oportunidades para o enfrentamento dos desafios à gestão de água de forma a ser mais sustentável e efetiva. Clemente *et al.* (2023) ressaltaram que a implementação de SBN para reduzir os impactos associados às mudanças climáticas, tanto em termos de mitigação das causas como de adaptação aos efeitos, é amplamente reconhecida e discutida na literatura científica. Ainda segundo Clemente *et al.* (2023), a aplicação desta técnica em uma área urbano-

costeira da cidade de Naples, na Itália, mostrou a capacidade que SBN tem de melhorar as condições resilientes de múltiplos riscos dos espaços abertos urbanos, como na redução dos danos econômicos devidos às inundações costeiras e na melhoria das condições de vulnerabilidade a ondas de calor. Como SBN, os citados autores avaliaram duas possibilidades: implantação de estrada com árvores em ambos os lados da pista; e estrada com pavimentação permeável e plantio de árvores nos canteiros.

Segundo David e Cardoso (2012), as medidas adaptativas que podem contribuir para prevenir e reduzir os efeitos da elevação do nível do mar e das alterações do regime de precipitação podem ser classificadas em três grupos, a saber:

- Medidas estruturais de engenharia convencional - incluem: aumento de volume de armazenamento no sistema de drenagem; instalação de válvulas de retenção, relocação e redimensionamento de estruturas de descarga sujeitas aos efeitos de maré; desconexão dos coletores de bacias de montante dos sistemas de drenagem das áreas ribeirinhas sujeitas a inundação.
- Medidas com pequenas estruturas descentralizadas - incluem um conjunto de técnicas de controle do escoamento na fonte, que podem ser ao nível de lote ou de pequenos subsistemas de drenagem, como: pavimentos permeáveis; poços e trincheiras de infiltração; telhados verdes; lagoas e bacias de detenção. Tais técnicas devem ser combinadas num sistema global coerente, conduzindo a uma gestão mais descentralizada das águas pluviais.
- Medidas não-estruturais - tais medidas permitem apoiar o controle do efeito combinado da subida do nível do mar e das alterações do regime de precipitação, incluindo: as atividades de operação e manutenção da infraestrutura de drenagem; as práticas de planejamento e projeto; as medidas legais e regulamentares; as ações de educação e conscientização da população; e os incentivos para o acúmulo ou retardo das águas pluviais em lotes urbanos, diminuindo assim, o lançamento na rede pública.

O Quadro 1 reúne algumas medidas adaptativas para a infraestrutura de drenagem urbana, com bom potencial de prevenção e redução dos problemas provocados pela elevação do nível do mar e alterações do regime de precipitação.

Existem outras várias soluções técnicas de infraestrutura, físicas e de gestão, sendo buscadas por cidades estuarinas e costeiras como parte de suas medidas adaptativas. A seguir, são listadas algumas das principais (C40, 2016; Jonkman *et al.*, 2013; WWF-Brasil, 2017):

- Paredões, diques e barreiras marinhas: As barreiras naturais à água (dunas costeiras e diques naturais) podem ser complementadas por muros artificiais permanentes e barreiras temporárias para prevenir inundações costeiras ou fluviais. Sua construção deve levar em

conta a elevação futura do nível do mar e a maior frequência de eventos extremos resultantes da mudança do clima.

- Infraestrutura “verde-azul” ou *Blue-Green Infrastructure* (BGI) - Tecnologia que utiliza recursos naturais para gerenciar a água e fornecer outros benefícios ambientais e comunitários. Ariyarathna *et al.* (2023) evidenciaram a eficácia do BGI como estratégia de mitigação de inundações, a partir de uma revisão sistemática de literatura, e ressaltou a necessidade de incentivo à pesquisa científica e aplicações no mundo real. O BGI conecta a ideia de água à infraestrutura verde e fornece soluções práticas com diversas vantagens. A *Green-Infrastructure* (GI), com plantas e vegetação, não só proporciona a adaptação direta e a absorção dos gases do efeito estufa, como também, tem outras vantagens: reduzir os riscos costeiros, reforçando as barreiras de proteção (ou seja, dunas de areia e praias), armazenar água (lagos e bacias hidrográficas) e fornecer uma zona de amortecimento entre o mar e os assentamentos urbanos. Khodadad *et al.* (2023) revelam que os artigos recentes que conectam GI e *Urban Flood Resilience* (UFR) são publicados, principalmente, por países científicos e economicamente poderosos, usando técnicas como: biovaletas, telhados verdes, etc.
- Bombeamento, tubulação e armazenamento - As infraestruturas de bombeamento, encanamento e armazenamento, juntamente com sistemas de drenagem melhorados, são tecnologias-chave de adaptação, que protegem o desenvolvimento urbano em chuvas fortes e inundações locais. Esses sistemas são especialmente importantes para cidades no estuário de rios, as quais podem encontrar-se abaixo do nível do mar e precisam controlar a água, mesmo fora das enchentes oriundas de ressacas, de tempestades ou dos eventos de inundação. Aumentar a altura do solo requer material agregado adicional, como areia e pedra, e muito bombeamento. Isso pode não estar disponível na região, o que torna o processo muito caro, deixando de ser uma opção.
- Outras medidas: Elevação da altura das áreas construídas, restauração e plantio de mangues, terras úmidas, restingas, várzeas e brejos que absorvem enchentes, diminuem a erosão e provêm habitat, e impedimento à ocupação irregular e loteamentos de áreas em risco.

Quadro 1. Medidas estruturais adaptativas de engenharia convencional.

1. Instalação de válvulas de retenção / comportas tipo flap:
<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo: Evitar a afluência da maré no sistema de drenagem urbana, reduzindo os alagamentos, a deposição de sedimentos e impactos nas redes. • Aplicação: Em pontos de descarga dos sistemas de drenagem, vulneráveis ao efeito de maré, ou em redes sujeitas ao refluxo. • Manutenção: Não há necessidade de manutenção específica, caso as válvulas não estejam sujeitas à acumulação de detritos ou não apresentem outros problemas, como: empenamento, vazamento, fissuração, entre outros. • Vantagens: Solução de baixo custo, com construção, instalação e manutenção simples. • Limitações: Podem estar sujeitas a incrustações, colagens, empenamentos e a ficarem presas. O peso próprio das válvulas em aço inoxidável exige alguma carga hidráulica para a sua abertura, e esse fato pode contribuir para os alagamentos.
2. Reabilitação do sistema de drenagem urbana:
<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo: Melhorar o desempenho hidráulico, estrutural, ambiental e operacional da rede; reduzir a intrusão de água subterrânea e de água salina por defeitos na rede. • Aplicação: Aplicável em toda a bacia, podendo ser particularmente relevante em áreas influenciadas por maré.
3. Construção de tanques ou reservatórios de detenção:
<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo: Amortecer o pico do hidrograma de cheia. • Aplicação: Em qualquer sistema de drenagem urbana, mas particularmente os localizados em áreas densamente urbanizadas, em que há menos opções de intervenção à superfície. • Manutenção: Estas estruturas requerem manutenção regular, podendo tornar-se bastante exigente em mão-de-obra se houver sedimentação. A influência de maré pode agravar as condições de sedimentação. • Vantagens: Requerem menos disponibilidade de espaço do que outras soluções; Solução relativamente bem conhecida e consolidada. • Limitações: Estas estruturas exigem geralmente alguma manutenção; quando é necessário bombear as águas pluviais armazenadas, esta medida conduz ao consumo de energia e ao conseqüente aumento de custos e de emissões de carbono.

Fonte: Adaptado de David e Cardoso (2012).

A utilização de comportas para controle da influência do nível de maré sobre a rede de macrodrenagem de ocupações antrópicas é fato comum em diversas regiões do planeta. No entanto, em países como o Brasil, há uma escassez de estudos locais a esse respeito. Tal temática tem se tornado relevante desde o aumento da demanda por diques e *polderes* para redução de risco de inundações em áreas densamente ocupadas, juntamente com a potencial elevação do nível do mar devido às mudanças climáticas. Em razão destes processos, a frequência da utilização deste tipo de dispositivo de controle de fluxo adaptados às condições locais também é crescente (Baptista *et al.*, 2011; Nogueira *et al.*, 2018).

Com relação a implantação dessa técnica no Brasil, têm-se o Sistema de Proteção Contra as Cheias do rio Guaíba, em Porto Alegre-RS, construído na década de 70 e formado por 68 km de diques, 18 casas de bombas e 14 comportas (Guimaraens, 2009). Recentemente, com as chuvas acumuladas no período de 26 de abril a 05 de maio de 2024, que representou cerca de 280% a mais do esperado para os meses de abril e maio (Rocha; Reboita; Crespo, 2024) e elevaram o nível do rio Guaíba a 5,35 m (superando a cheia de 41 = 4,76 m) (ANA, 2024), o sistema não conteve a magnitude da cheia e deixou vários pontos da Região Metropolitana de Porto Alegre inundados. Segundo dados da Defesa Civil de RS (Defesa Civil, 2024), até 20 de agosto de 2024, 478 municípios foram atingidos, 806 feridos, 27 desaparecidos, 183 óbitos e 2.398.255 pessoas afetadas pelo evento extremo.

No âmbito dos estudos, Nogueira *et al.* (2018) avaliaram, no modelo PCSWMM Professional 2D, o desempenho do sistema de macrodrenagem costeiro da bacia do Guaramar, na cidade de Praia Grande (SP), para eventos de chuvas de alta intensidade (TR de 10, 50 e 100 anos) e baixa duração (3h) combinados com diferentes níveis de maré. A bacia é marcada pela existência de um dique que protege parte da bacia, atuando em conjunto com comportas do tipo *flap* (com 4 válvulas de 0,8m diâmetro cada), que controlam o fluxo entre o estuário e a rede de macrodrenagem. Os autores verificaram que a presença das comportas é fundamental para o funcionamento do dique, mantendo a rede de macrodrenagem livre para amortecer ondas de cheia. Sem as comportas, a maré alta de 1,4 m (cota mínima do dique) atingiria ocupações em zonas de baixio, mesmo sem a ocorrência simultânea de evento de chuva.

Macedo (2017) verificou, utilizando o SWMM, o desempenho de medidas adaptativas para a infraestrutura de drenagem urbana da bacia de Bento Ferreira, em Vitória (Espírito Santo, Brasil), a partir de cenários atuais e futuros. Para a cidade costeira, o autor simulou, como cenário futuro, um incremento de 10 e 20% na intensidade de precipitação (correspondente a TR = 25 anos) e de 0,4 a 0,8 metros no nível do mar. Foram avaliadas três medidas: a construção de 4 reservatórios enterrados em locais estratégicos; e o aumento na seção de galerias em alguns

trechos e o aumento da capacidade de bombeamento, instalado a jusante do sistema. O autor observou que a medida mais viável, técnica e economicamente, é a construção dos 4 reservatórios, com volumes variando de 10.000 a 20.000 m³ e um custo total aproximado de 20 milhões de euros (aproximadamente R\$: 90 milhões).

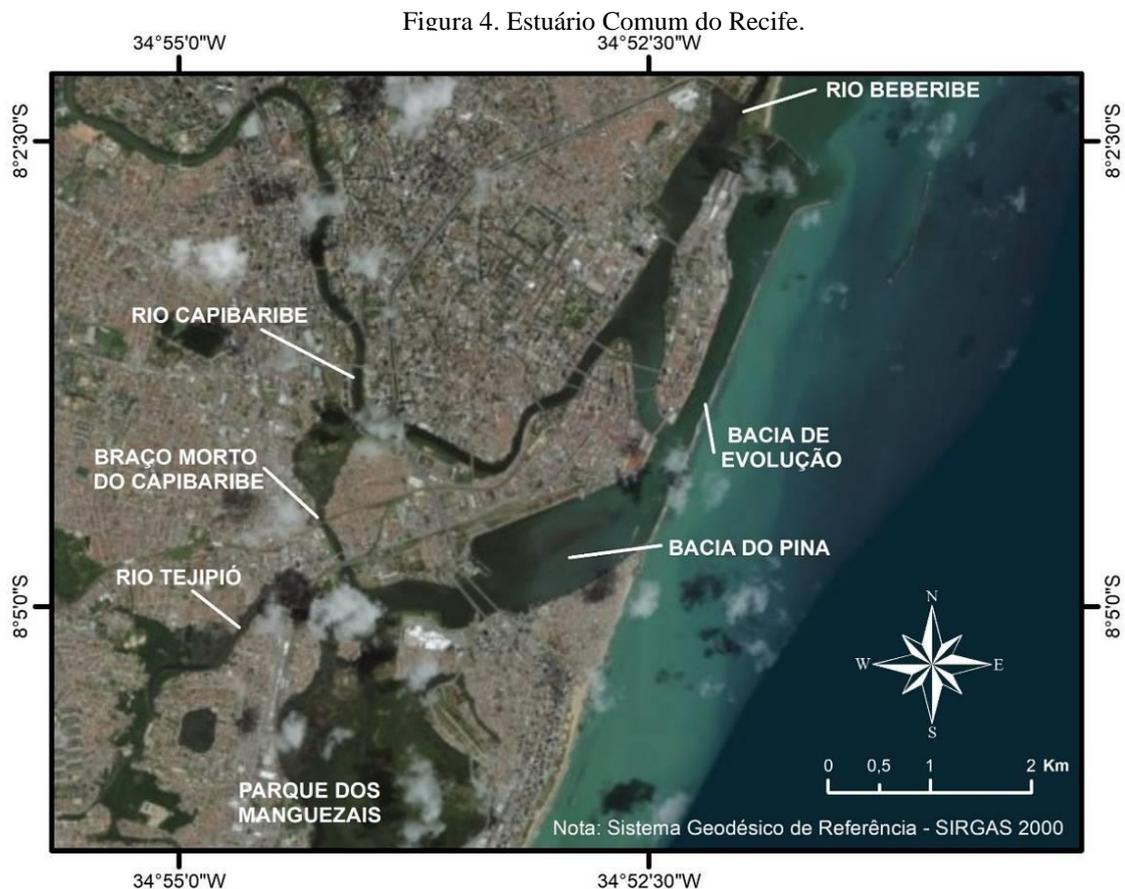
Wu *et al.* (2017) simularam, com a acoplagem do SWMM e LISFLOOD-FP, os impactos dos cenários de mudança do clima para o distrito de Shiqiao Creek, na cidade de Dongguan (China), combinando situações de chuvas extremas, aumento do nível do mar e subsidência do solo. A área de 2 km² tem topografia plana e precipitação anual de 1.770 mm. Num cenário combinado entre chuvas extremas de 100 anos de recorrência, 0,5 m de subsidência e 0,7 m de elevação do nível do mar, as inundações na área ocorreriam de forma catastrófica, podendo chegar a 2,60 m. Os autores avaliaram, ainda, que uma adaptação ideal contemplaria um desenvolvimento de baixo impacto com 0,2 km² de pavimentos permeáveis, 0,1 km² de barris de chuva e 0,7 km² de telhados verdes, verificando redução 0,80 m na altura de inundação para o cenário mais crítico.

Em condições similares de chuvas extremas, nível do mar e subsidência do solo encontra-se a cidade de New Orleans. Está situada no sudeste da Louisiana (EUA), território na planície estuarina do Mississipi e é protegida de inundações por diques ao longo da linha costeira do Lago Pontchartrain que variam de 4,5 a 6 m acima do nível médio do mar. Possui uma extensa rede de canais de drenagem (108 km de canais de superfície e subsuperfície) e 22 estações de bombeamento, onde boa parte das águas pluviais é bombeada sobre os diques (Carbonell; Meffert, 2009). Burkett, Zilkoski e Hart (2003) relatam que além de estar situada abaixo do nível mar (1,5 a 3 metros), o território sofre com subsidência provocado pela, entre outras causas, compactação de sistemas aquíferos relacionados à retirada de água subterrânea. Os autores avaliam que considerando a taxa de afundamento e a estimativa média da elevação do nível do mar durante os próximos 100 anos (480 milímetros), as áreas de New Orleans e arredores provavelmente estarão de 2,5 a 4,0 metros (ou mais) abaixo do nível do mar até 2100, sendo necessário readequar a infraestrutura de drenagem existente.

2.4. RECIFE E A DRENAGEM URBANA: PROBLEMÁTICAS E PECULIARIDADES

O Recife é uma cidade estuarina e costeira, situada na Região Nordeste do Brasil, fortemente urbanizada e constantemente acometida por alagamentos. Possui uma área de 218,843 km² e uma população de 1.488.920 habitantes, de acordo com o último Censo do IBGE de 2022. É caracterizada com alta densidade populacional do litoral, um percentual elevado de impermeabilização do solo e baixas altitudes da região costeira, entre 2 e 4 m. O clima é predominantemente quente, com temperatura média de 25°C, precipitação média anual de 2.447 mm (período das chuvas concentrado entre março e agosto) e umidade relativa média anual de 80% (IBGE, 2022; Pernambuco, 2011; Recife, 2017; Silva Junior *et al.*, 2020).

A cidade conta com um sistema de drenagem natural que envolve um conjunto de bacias hidrográficas denominado por “Estuário Comum do Recife”, que é formado pelas desembocaduras dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió (Figura 4). São áreas de planície costeira e estuarina com alta vulnerabilidade à inundação em cenário de elevação do nível do mar. Além disso, Luna *et al.* (2017) identificaram subsidência do solo de 0,68 mm/ano provocada por exploração da água subterrânea.



Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

De acordo com Preuss *et al.* (2011), o Recife possui peculiaridades geográficas que devem ser consideradas para a sustentabilidade do seu sistema de drenagem. As baixas cotas de seu território em relação ao nível do mar, áreas planas, lençol freático próximo à superfície e aflorante na estação chuvosa, influência dos níveis das marés, são características naturais que dificultam a drenagem das águas pluviais na cidade. Além disso, a drenagem urbana do Recife também é prejudicada devido à canalização dos riachos urbanos e às ocupações de suas margens, alta taxa de impermeabilização do solo, destino inadequado dos resíduos sólidos e falta de saneamento (Cabral; Alencar, 2005).

Além das linhas de drenagem natural, o sistema de macrodrenagem da cidade é composto por 99 canais (a maior parte deles são riachos naturais que receberam revestimento nas paredes), totalizando 133 km de extensão (média de 0,60 km de canal por km²). Cerca de 63% da extensão total da rede de canais têm seção hidráulica revestida. A microdrenagem, composta em sua maioria por galerias e canaletas, possui uma extensão aproximada de 1.558 km (Emlurb, 2016).

Diante das peculiaridades urbanísticas e geográficas, o Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas da Cidade do Recife - PDDR (Emlurb, 2016) mapeou, em 2016, 159 pontos de alagamentos (a maioria no sistema viário), catalogados pela Emlurb (Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana) como os mais críticos. Desse total, Lafayette *et al.* (2018) relatam que em 4 anos (2013-2017) foram solucionados 71 pontos críticos de alagamento, realizando apenas serviços de limpeza e pequenas obras de reparo e substituição das redes de drenagem (manutenção corretiva), custando aos cofres públicos R\$ 17,14 milhões. Ainda segundo os autores, para efetivar a limpeza de toda a rede de microdrenagem da cidade no período de 4 anos, seria necessário aumentar 4 vezes a mobilização atual das equipes de limpeza, resultando num aporte de R\$ 125,6 milhões.

O Recife já foi palco de diversos eventos de cheias do rio Capibaribe, sendo o mais expressivo ocorrido em 1975. Com a construção das barragens de contenção no baixo Capibaribe para controle de enchentes na RMR, em especial a Barragem de Carpina (inaugurada em 1978), os transtornos das chuvas se reportam, atualmente, a alagamentos pontuais em vias urbanas, por ineficiência da rede de microdrenagem. No entanto, as bacias menores como as dos rios Tejipió e Beberibe, anualmente têm sido alvo de eventos extremos nos períodos chuvosos, causando danos materiais aos ribeirinhos (Silva Junior *et al.*, 2020).

Apesar das atenuantes na bacia do rio Capibaribe, Fonseca Neto (2018) relata que em 2011, populações ribeirinhas sofreram com inundações devido à abertura das duas comportas da barragem de Carpina, que juntas chegam a liberar cerca de 400 m³/s (Pernambuco, 2010). O

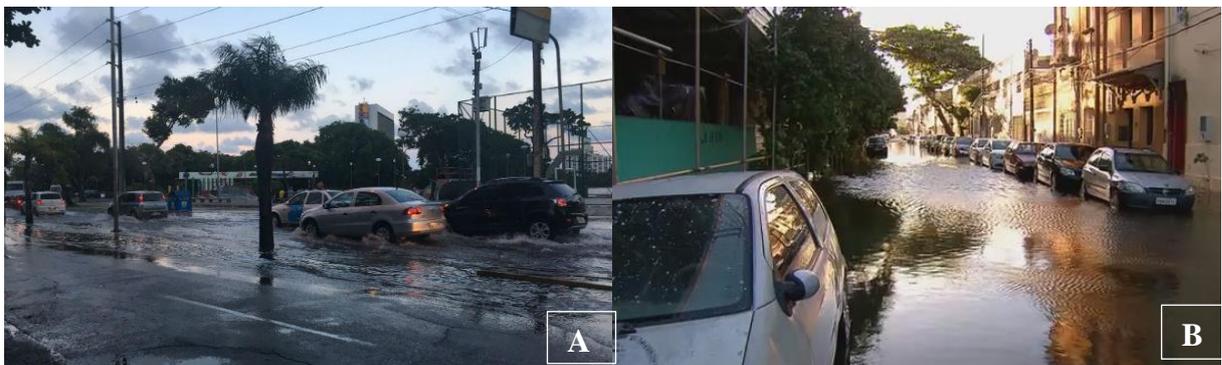
autor conta ainda que naquela ocasião, o reservatório estava próximo da sua capacidade máxima e havia a previsão de mais chuvas na região. No ano de 2009 as comportas receberam reparos e foram abertas para teste. Segundo Pernambuco (2009), nesta ocasião houve um prévio aviso às populações que viviam às margens do rio Capibaribe, a fim de reduzir os transtornos dessa vazão.

2.4.1. Vulnerabilidade climática: situação atual e prevista

a) Marés:

Nas últimas décadas, o Recife vem sendo afetado pelos impactos provocados com a mudança do clima. De acordo com PBMC (2016), o nível do mar na costa pernambucana aumentou 5,6 mm/ano no período de 1946 a 1988, uma elevação de 24 cm em 42 anos. É válido ressaltar que, de acordo com as previsões astronômicas de maré do Porto do Recife (Tábua de Marés), desenvolvidas pela DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, a ocorrência de marés de 2,7 m tem aumentado nos últimos anos (desde 2011). Antes disso, até o ano de 2005, as marés máximas previstas eram de 2,5 m. Atualmente, as amplitudes de maré chegam a 2,8 m e nessa condição, sem chuvas, algumas áreas da cidade já apresentam alagamentos: nos bairros de Santo Amaro – Rua Dr. Silva Ferreira, Rua da Aurora (Figura 5a), Rua Capitão Lima (Figura 5b), Rua do Sossego, Rua Coelho Leite, Rua Artur Coutinho e Avenidas Mario Melo e Prefeito Arthur Lima Cavalcanti – e Boa Viagem – Rua Barão de Souza Leão e Rua Mamanguape (Silva Junior *et al.*, 2020). Em Santo Amaro, Oliveira *et al.* (2015) afirmam que algumas áreas do bairro foram originadas por aterros de zonas inundáveis no século 17 e que, atualmente, esses locais possuem pontos de alagamentos.

Figura 5. Alagamentos no bairro de Santo Amaro por maré de 2,7 m. A) Rua da Aurora; B) Rua Capitão Lima.



Fonte: G1 (2016); Silva Junior *et al.* (2020).

O IPCC (2014) revela que, para a região do litoral brasileiro, espera-se um aumento de 0,4 a 0,5 m no NMM até 2100, cenário otimista (com a estabilização na emissão de gases do efeito estufa), e aumento de 0,6 a 0,7 m, cenário crítico (com o aumento na emissão de gases do efeito estufa). A nível global, o IPCC (2022) prevê que o NMM poderá subir entre 60 e 110 centímetros até 2100, considerando um forte aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para o Recife, a maré de 2,7 m corresponde a cota 1,56 m (zero do IBGE no Porto do Recife). Considerando as projeções do IPCC (2014), o cenário otimista terá marés máximas de 3,2 m (cota 2,06 m), enquanto o cenário crítico apresentará marés máximas de 3,4 m (cota 2,26 m).

Ainda nesse contexto, Costa *et al.* (2010) avaliaram os efeitos da elevação do nível do mar na planície do Recife, a partir dos cenários otimista (+0,5 m) e crítico (+1,0 m). Os resultados apontaram que para o cenário otimista, estima-se que a área alagada seria de 25,4 km², enquanto que no cenário crítico a área inundada seria de 33,7 km². Em termos percentuais, os cenários otimista e crítico inundariam 50% e 66% da área de planície do Recife, respectivamente. Dentre as áreas propensas à inundação, em ambos os cenários, os autores chamam atenção para o Recife Antigo, que é um importante centro econômico e administrativo da cidade e possui grande valor histórico e cultural. Não diminuindo a criticidade, mas é válido ressaltar que as cotas consideradas para a inundação por elevação do NMM (3,1 m para o cenário otimista e 3,6 m para o cenário crítico) encontram-se bem acima do previsto pelas projeções do IPCC (2014), podendo ter majorado os resultados obtidos.

Sousa Neto (2009) analisou os impactos da elevação do nível do mar no Recife com base nas projeções do IPCC (2007) e nas estimativas feitas por Fernandes (2008) para 2100, considerando a cota máxima de inundação de 1,6 m. O autor verificou que algumas áreas na cidade seriam atingidas, como: a zona portuária da cidade e localidades dos bairros de Santo Amaro (Rua Batista Ragueira), Boa Vista (Rua Dr. José Mariano), Santo Antônio (Rua do Sol e Praça da República) e Ilha do Leite (Rua Padre Venâncio e Viaduto Joaquim Cardoso). Ainda segundo o autor, a região mais vulnerável é a Zona Sul da cidade. Nessa área, encontra-se o Parque dos Manguezais que sofrerá influência direta do aumento do NMM, chegando a atingir parte do Aeroclube, no bairro do Pina. Ainda no bairro do Pina, as águas da bacia do Pina poderão atingir a Avenida Engenheiro Antônio de Góes e ruas adjacentes, podendo chegar ao bairro de Brasília Teimosa. Já no bairro de Boa Viagem, o autor revela que o mar avançaria sobre quase todo o calçadão da Av. Boa Viagem e traria impactos, também, a Av. Visconde de Jequitinhonha.

Fonseca Neto *et al.* (2017) avaliaram o comportamento hidrodinâmico do riacho Cavouco, afluente do rio Capibaribe, a partir dos efeitos da elevação do NMM (cota IBGE: 2,0 m) e de chuvas torrenciais (TR = 10 anos). Para os autores, tal impacto provocaria alagamentos nas áreas ribeirinhas e impediriam as saídas das redes no riacho, na ocorrência combinada de maré alta e chuva intensa.

Silva (2019) instalou um medidor de nível no rio Tejipió, situado no bairro do Caçote e distante a 8 km, aproximadamente, da linha de costa, para avaliar a incursão da maré. O autor observou que a dinâmica hidráulica no rio é conduzida pelas oscilações diárias das marés, corroborando com Alcoforado (2006) que apontou influência das marés em toda a macrodrenagem presente na região de planície do Recife, considerando marés de 2,5 m (na tábua do Porto do Recife). Ainda segundo Silva (2019), quando avaliada a vulnerabilidade do rio Tejipió frente aos cenários climáticos futuros, o autor constatou que eventos de chuvas intensas combinados com maré alta (com o aumento do NMM de 82 cm) poderia inundar cerca de 17,54% da região de planície de sua bacia.

Fonseca Neto *et al.* (2022) avaliaram, de forma espacial e quantitativa, as áreas inundadas por marés em dias de sol no território recifense, considerando a aumento do nível médio do mar (NMM) em decorrência das mudanças climáticas. Para isso, os autores utilizaram os Modelos Digitais de Terreno do PE 3D e um aumento do NMM de +0,70 m, para uma maré de 2,70 m (DHN) equivalente a 1,56 m (IBGE). Os autores observaram que para uma maré máxima de 2,26 m (IBGE), 28 bairros apresentariam áreas passíveis de inundação, com destaque para os bairros de Santo Amaro, Ilha do Leite, Boa Viagem, Afogados, Jiquiá, Imbiribeira e IPSEP.

O comportamento do nível do mar em relação aos sistemas de drenagem é fator determinante para a eficiência do seu desempenho na ocorrência dos eventos extremos de precipitação. Isso porque durante as preamares, haverá uma diminuição na diferença de altitude entre a área a ser drenada e o local para onde a água irá fluir, deixando o sistema mais lento, sobretudo, nos locais onde a drenagem for por gravidade. Tal situação deixará o sistema mais vulnerável à ocorrência de falhas estruturais, hidráulicas e ambientais, comprometendo sua vida útil (Silva Junior; Silva, 2014, 2016; Silva Junior *et al.*, 2020).

b) Chuvas intensas:

No tocante às chuvas intensas, sabe-se que para o dimensionamento do sistema de drenagem urbana (SDU), um dos fatores importantes é a chuva de projeto. Geralmente ela é

obtida através da equação IDF (intensidade, duração e frequência) da região. Como os SDU são projetados com base nas chuvas, as mudanças do clima influenciarão diretamente seu desempenho (Zamani *et al.*, 2023).

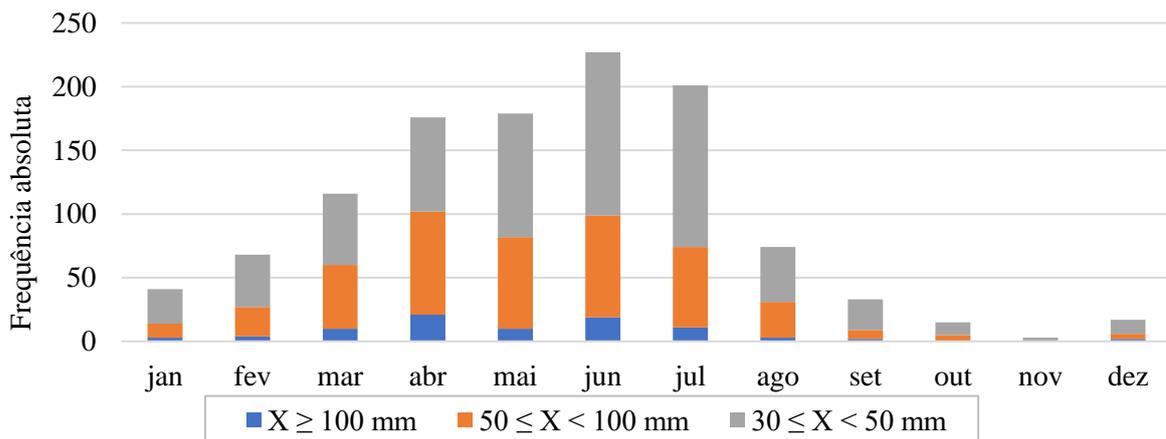
No Recife, em meados da década de 80, foi elaborada a equação IDF da RMR (Região Metropolitana do Recife) no âmbito do Plano Diretor de Macrodrenagem da RMR, desenvolvido pela Fidem (1985). Na elaboração da equação foram utilizados os pluviogramas do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, contemplando 15 anos de dados da estação Olinda (1926-1933, 1936, 1937, 1939, 1941-1943, 1954) e 10 anos da estação Curado (1960, 1961, 1963, 1970, 1970-1976). Com essa referência, é provável afirmar que grande parte do sistema de drenagem do Recife foi dimensionado a partir da citada equação. Em 2016, no âmbito do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Recife - PDDR (Emlurb, 2016), foi definida uma nova equação IDF, a partir das precipitações máximas anuais em três postos pluviométricos (Recife-Caxangá, Recife-Curado e Recife-Várzea), abrangendo uma série histórica de 85 anos (1927-2011).

A partir destas equações, Silva Junior e Silva (2016) compararam as intensidades de chuva calculadas pelas equações IDF da Fidem (1980) e da Emlurb (2016). Foi verificado que as intensidades de chuva para durações menores (5, 10, 15 e 30 min.) chegam a ser 34% superiores com a equação IDF mais recente, considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos. Ainda segundo os autores, o aumento nas intensidades de chuva, aliado ao desenvolvimento urbanístico, gera vazões incrementais no escoamento superficial que poderão comprometer a eficiência dos sistemas de drenagem. As diferenças nas intensidades de chuva se devem, provavelmente, ao período da série de dados utilizados e à possíveis alterações no regime de chuvas, ambos influenciados pelo efeito das mudanças climáticas (Ramos; Azevedo, 2010). Por isso, existe a necessidade de atualizações de equações de chuvas, a fim de evitar os subdimensionamentos de obras hidráulicas.

Boa parte da literatura, que tem como enfoque as precipitações extremas no meio urbano, consideram que chuvas a partir de 30 mm em 24 h já podem causar impactos na rotina de uma cidade (Souza; Azevedo; Araújo, 2012; PBMC, 2016; Fonseca, 2017; Wanderley *et al.*, 2018; Nunes; Pinto; Baptista, 2018).

Os valores extremos de chuva em 24 h medidos em estações do INMET, como o posto Curado (Recife), registram os totais acumulados de chuva entre 9 h do dia anterior e 9 h do dia em questão. Nesse sentido, a Figura 6 mostra a frequência absoluta destes eventos no mês, caracterizados pelos intervalos de totais precipitados no dia: acima de 100 mm; entre 50 e 100 mm; e entre 30 e 50 mm. Ao analisar a frequência desses eventos em Recife, foram encontrados um total de 1140 registros entre 1961 e 2017, caracterizando uma média de 20 ocorrências por ano. Os meses de junho e julho são aqueles em que é registrada a maior ocorrência desses eventos, com 227 e 201 eventos iguais ou superiores a 30 mm, respectivamente. Já os meses de outubro a dezembro são aqueles com menor registro de chuvas diárias fortes ($30 \leq X < 50$ mm), muito fortes ($50 \leq X < 100$ mm) ou extremamente fortes ($X \geq 100$ mm) (Silva Junior *et al.*, 2020).

Figura 6. Frequências mensais absolutas dos eventos ocorridos entre 1961 e 2017 no Recife, por faixa de chuva.



Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

Estudos recentes de Wanderley *et al.* (2018), Silva, Montenegro e Souza (2017) e Souza e Azevedo (2012), indicaram haver aumento na ocorrência de chuvas muito fortes (≥ 100 mm) e concentradas em 24 h no Recife, nos últimos anos. Recife (2019) afirma que as projeções futuras de precipitação geradas pelos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando os cenários intermediário (RCP 4,5) e o pessimista (RCP 8,5) para a cidade do Recife, até o final do século XXI, indicam um aumento na duração de dias secos, com redução do acumulado de chuva em relação aos dias de hoje. As chuvas intensas e os indicadores de maior precipitação em um dia e acumulada em cinco dias mostram tendências de aumento. Tais perspectivas acendem um sinal de alerta para a cidade, que já possui um sistema de drenagem fragilizado e altamente vulnerável às oscilações de maré, uma vez que as chuvas serão mais intensas e concentradas em um curto período de tempo.

Wanderley *et al.* (2018), por exemplo, afirmam que, a partir de uma análise da série histórica do posto Recife - Curado (INMET), entre os anos de 1961 e 2001 pode ser identificado um primeiro ciclo, com recorrência média de 2,3 anos sem registro de eventos iguais ou superiores a 100 mm, associada a uma recorrência média de 8,5 anos com registro de quatro eventos diários de chuvas dessa magnitude. Em um segundo ciclo, delimitado entre 2002 e 2016, foi registrado apenas um ano sem ocorrência de eventos diários iguais ou superiores a 100 mm, com uma recorrência de 1,6 anos para registro de pelo menos dois eventos (Wanderley *et al.*, 2018).

Tomando como base o citado posto, a Tabela 2 mostra os valores máximos anuais de chuvas diárias. A Figura 7 apresenta a curva de distribuição Log-Normal gerada pelos valores de precipitação máxima diária anual (Tabela 2) e a frequência de excedência a partir da fórmula de Weibull. Segundo Emlurb (2016), tal lei de distribuição de probabilidade, Log-Normal, geralmente se aplica muito bem a valores extremos.

Tabela 2. Máximas precipitações diárias anuais no Recife – Estação Recife (Curado) (1961 – 2017).

Ano	Prec. Máxima (mm)	Ano	Prec. Máxima (mm)	Ano	Prec. Máxima (mm)
1961	77,2	1980 ⁹	159,7	1999	81,3
1962	149,2	1981	71	2000 ³	185,9
1963	87,6	1982	104,7	2001	74,6
1964	125,5	1983	123,1	2002	141,1
1965 ⁴	176,4	1984	100,4	2003	145,7
1966	115,6	1985	89,4	2004	113,2
1967	74,7	1986 ^{2,10}	235	2005	141,1
1968	101,3	1987	90	2006	93,4
1969	135,9	1988	114,4	2007	118
1970 ¹	335,8	1989	108,9	2008	116
1971	104,8	1990 ^{5,7}	176,4	2009	122,8
1972	85,6	1991	102,6	2010	149,7
1973 ^{6,8}	165,3	1992	92	2011	135,8
1974	98	1993	79,5	2012	121,8
1975	99	1994	146	2013	119,8
1976	106,6	1995	120	2014	106,4
1977	92	1996	144	2015	139,3
1978	97	1997	85,6	2016	119,8
1979	97,2	1998	50,9	2017	81,6

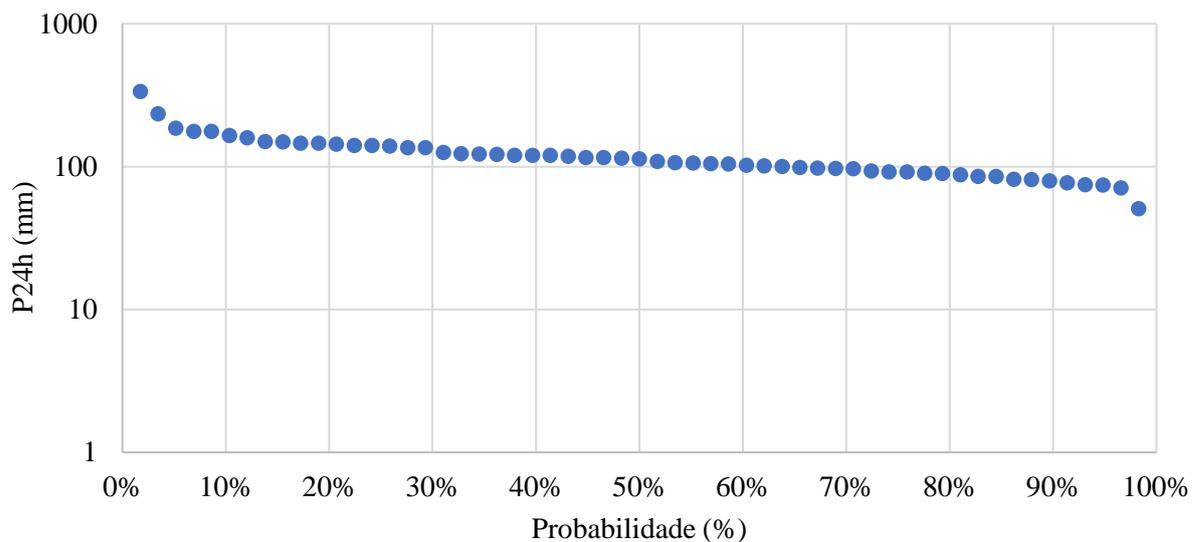
Nota: ^{1,2,...} Dez maiores eventos de precipitação diária em Recife (¹11/08/1970: 335,8 mm; ²24/05/1986: 235 mm; ³01/08/2000: 185,9 mm; ⁴12/06/1965: 176,4 mm; ⁵29/07/1990: 176,4 mm; ⁶22/04/1973: 165,3 mm; ⁷29/06/1990: 162,8 mm; ⁸21/07/1973: 162 mm; ⁹10/06/1980: 159,7 mm; ¹⁰08/04/1986: 154,2 mm).

Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

A Tabela 2 destaca as dez maiores precipitações diárias ocorridas no Recife entre 1961 e 2017. Observa-se que o maior registro de chuva diária ocorreu em 11/08/1970 com 335,8 mm. Também se observou que quase a totalidade dos registros máximos de precipitação ocorreram antes da década de 90, com a única exceção do evento de 01/08/2000, com 185,9 mm. Outra observação importante é que tais eventos se concentraram, em sua maioria, no período chuvoso (entre março e julho), com exceção dos dois citados eventos ocorridos em agosto.

O gráfico de probabilidade de ocorrência de eventos diários de precipitação (Figura 7) revela que um evento com volume de 79,5 mm possui 90% de chance de ocorrer a cada ano, um com volume de 102,6 mm possui chance de 60%/ano, um com volume de 135,8 mm possui chance de 30%/ano e um com volume de 165,3 mm possui chance de 10%/ano, corroborando com os resultados apontados por Wanderley *et al.* (2018) e Emlurb (2016).

Figura 7. Distribuição teórica (Log-Normal) das máximas chuvas diárias anuais de 1961 a 2017 (Recife - Curado).



Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

Quando aplicada a distribuição de Gumbel para os máximos valores diários de precipitação, registrados por ano, é possível obter o tempo de retorno e o volume precipitado equivalente. Dito isto, na Tabela 3 são apresentados os totais diários de precipitação para as recorrências de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos obtidos por Silva Junior *et al.* (2020) e comparados com outras referências. A partir da série do Posto Curado (1961-2017), utilizada neste estudo e com análise publicada por Silva Junior *et al.* (2020), as chuvas na ordem de 150 mm/dia equivalem ao TR de 5 anos, corroborando com os valores de Silva e Araújo (2013) e Wanderley *et al.* (2018) – 149 mm/dia e 152 mm/dia, respectivamente. Percebe-se que os valores obtidos pela Emlurb (2016) são maiores do que os encontrados por Silva Junior *et al.* (2020) e nas

demais referências. Esse fato pode estar atribuído ao tamanho da série histórica da Emlurb (2016) ser maior, com 85 anos de dados.

Tabela 3. Tempo de retorno dos eventos de precipitação máxima diária/ano para a cidade do Recife.

TR	P 24h (mm)			
	Valores obtidos (Silva Junior <i>et al.</i> (2020))	Silva e Araújo (2013) ¹	Emlurb (2016) ²	Wanderley <i>et al.</i> (2018) ³
2	112,5	118,32	129	112,7
5	151,5	149	163,06	151,9
10	177,3	169,7	190,20	177,9
25	209,9	195,36	224,13	212,9
50	234,1	214,6	249,21	239,9
100	258,1	233,8	274,15	267,1

Nota: ¹PCD Recife (ITEP) com 9 anos de dados (2003-2011); ²Recife-Caxangá, Recife-Curado e Recife-Várzea com 85 anos (1927-2011); ³Estação Recife - Curado com 56 anos (1961-2016).

Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

c) Chuvas intensas e efeito das marés:

Como já dito, a cidade do Recife é bastante prejudicada nos períodos de chuva, não só pelo processo desordenado de urbanização que foi concebida, mas também por apresentar peculiaridades geográficas de uma cidade litorânea, o que dificulta ainda mais a eficiência de sua drenagem quando há combinação entre precipitações intensas e efeito das marés. Para a análise desta combinação, Silva Junior *et al.* (2020) selecionaram os eventos de precipitação mais relevantes (acima de 100 mm) e ocorridos nos últimos cinco anos (anteriores a 2020). Os registros horários de precipitação foram obtidos da Estação Automática do INMET - Recife (A301), com série histórica desde 2004, e as previsões de marés do Porto do Recife foram obtidas no site da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e interpoladas de hora em hora.

As chuvas avaliadas ocorreram em: 17/05 e 19/12 de 2013; 26/06/2014; 04/07/2015; 16/04 e 09/05 de 2016; e 13/06/2019. Os impactos decorrentes de tais eventos se refletiram, principalmente, na mobilidade urbana, com alagamentos em vários pontos estratégicos da cidade, além de provocar deslizamentos em áreas de morro, causando mortes e desabrigados, com ampla divulgação da mídia.

A partir da relação direta da precipitação diária de cada evento (Tabela 4), com as recorrências equivalentes (Tabela 3), é possível afirmar que os TRs para os eventos chuvosos nos dias: 17/05/2013 (146 mm) foi de 5 anos, corroborando com Silva Junior e Silva (2014); 13/06/2019 (169,2 mm) esteve entre 5 e 10 anos; e os demais eventos em torno de 2 anos, concordando com as análises das chuvas de 26/06/2016 (106,8 mm) feitas por Silva Junior,

Silva e Cabral (2017) e de 09/05/2016 (127 mm) feitas por Silva (2018a) e Oliveira (2017). A partir das recorrências calculadas para as chuvas, é possível afirmar que não se tratam de eventos raros.

A Figura 8 mostra uma sequência gráfica comparativa entre as alturas de chuva e de maré por hora, para cada evento considerado. Nela é possível observar a variação da maré durante a ocorrência dos eventos chuvosos. Tais fatores concomitantes acarretaram em sérios problemas para a cidade, que foram agravados quando havia a coincidência entre a chuva intensa e a maré alta, como o ocorrido nos eventos de 17/05/2013 e 13/06/2019. Nos demais eventos, mesmo não tendo a coincidência entre as variáveis climáticas, a inoperância do sistema de drenagem provocou alagamentos na cidade. Nos eventos chuvosos de 17/05/2013 e 16/04/2016 ocorreram marés de quadratura², com preamares de 1,8 m e amplitudes próximas de 1 m. Nos demais eventos, as marés foram de sizígia³, com preamares de 2,5 m e amplitudes acima de 2 m.

Silva Junior e Silva (2014) contam que a chuva ocorrida em 17/05/2013 correspondeu a 40% do total precipitado no mês de maio. Ainda sobre este evento, a maior parte do total precipitado (100,4 mm) ocorreu entre 5 e 8 h, com preamar de 1,8 m às 8h57 (Figura 8). No evento chuvoso de 26/06/2014, Silva Junior, Silva e Cabral (2017) relatam que a precipitação deste dia correspondeu a 35% do total da média do mês de junho. Neste dia, ocorria uma das partidas de futebol da Copa do Mundo de 2014. A maior parte da chuva se concentrou num curto período, com precipitação de 66,80 mm entre 6 e 10 h. Na oportunidade a maré estava baixa, atingindo a baixa-mar de 0,30 m às 9h45 (Figura 8).

Em 13/06/2019, Silva Junior *et al.* (2020) afirmam que o volume de chuva equivaleu a 15 dias do mês de junho, em relação à média histórica para o período, que é de 389,60 mm. Ainda segundo os autores, o total precipitado neste dia foi de 169,2 mm, com 144,6 mm em 12 h (entre 7 e 19 h). No início deste período, às 6h55, a maré estava baixa (0,5 m) e atingiu o pico às 13h13 (2,3 m), quando já havia precipitado mais de 80% do total ocorrido no dia.

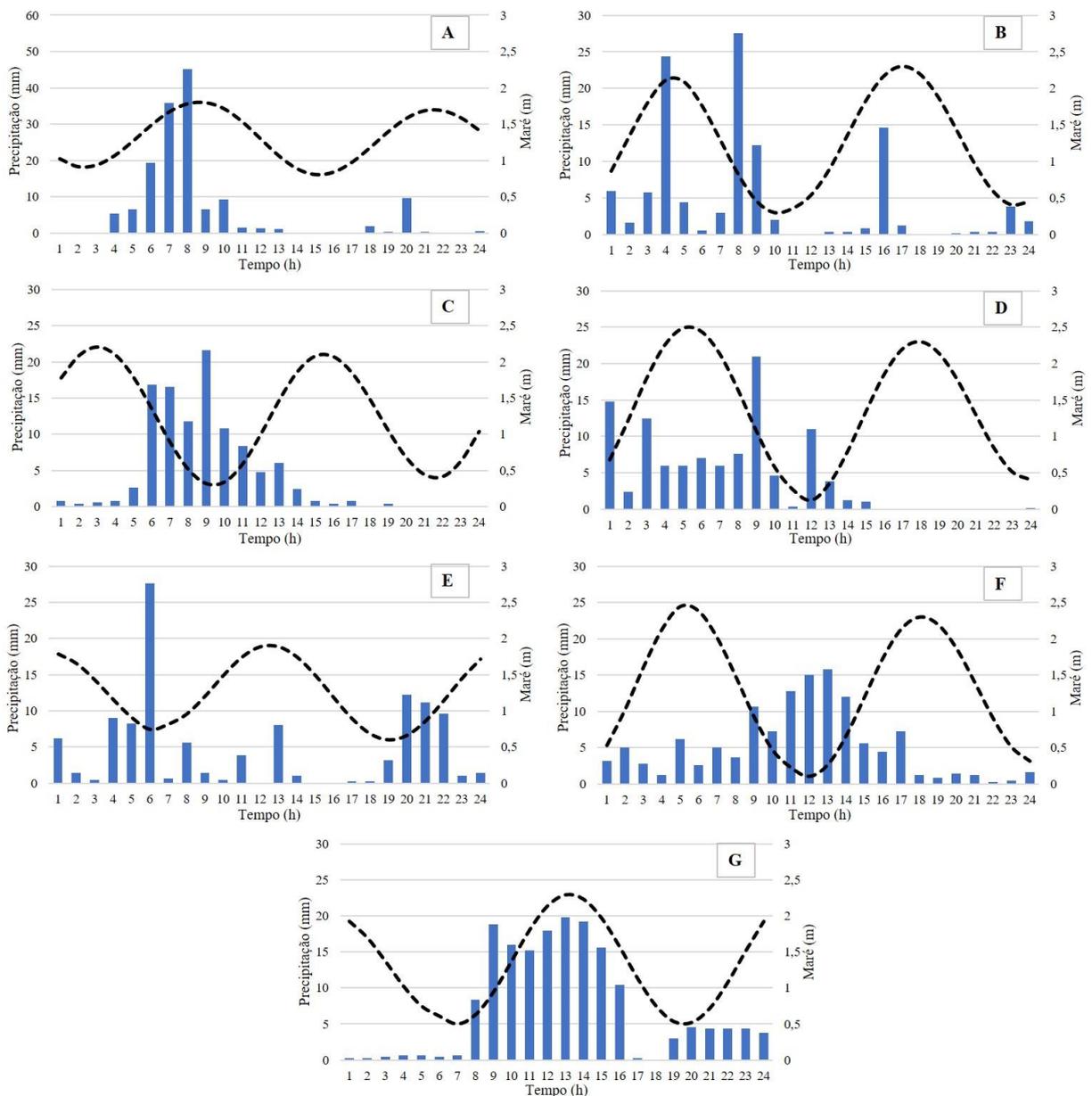
Apesar dos eventos extremos serem caracterizados pela chuva diária, observa-se que quase a totalidade da precipitação ocorre antes das 24 h. A Figura 9 mostra o gráfico com a distribuição dos totais máximos precipitados por fração de duração dos eventos considerados.

² **Maré de quadratura:** ocorre quando a Lua está no quarto minguante ou crescente, as forças gravitacionais da Lua e do Sol se opõem, desta forma a amplitude entre a maré alta e a maré baixa será menor.

³ **Maré de sizígia:** ocorre durante a Lua Cheia e Lua Nova, quando a força gravitacional da Lua combinada com a do Sol, cria amplitudes maiores da maré.

Observa-se que, em média, 20% dos totais precipitados ocorreram em 1 h, representando uma intensidade de 25,5 mm/h. Em contrapartida, a chuva do dia 17/05/2013 teve quase o dobro dessa intensidade, com precipitação de 45,2 mm em 1 h. Em média, mais de 80% da chuva diária se concentrou em 12 h, com períodos mais intensos durante o horário comercial, onde há maior movimento na cidade.

Figura 8. Chuva e maré por evento extremo no Recife. A) 17/05/2013; B) 19/12/2013; C) 26/06/2014; D) 04/07/2015; E) 16/04/2016; F) 09/05/2016; G) 13/06/2019.



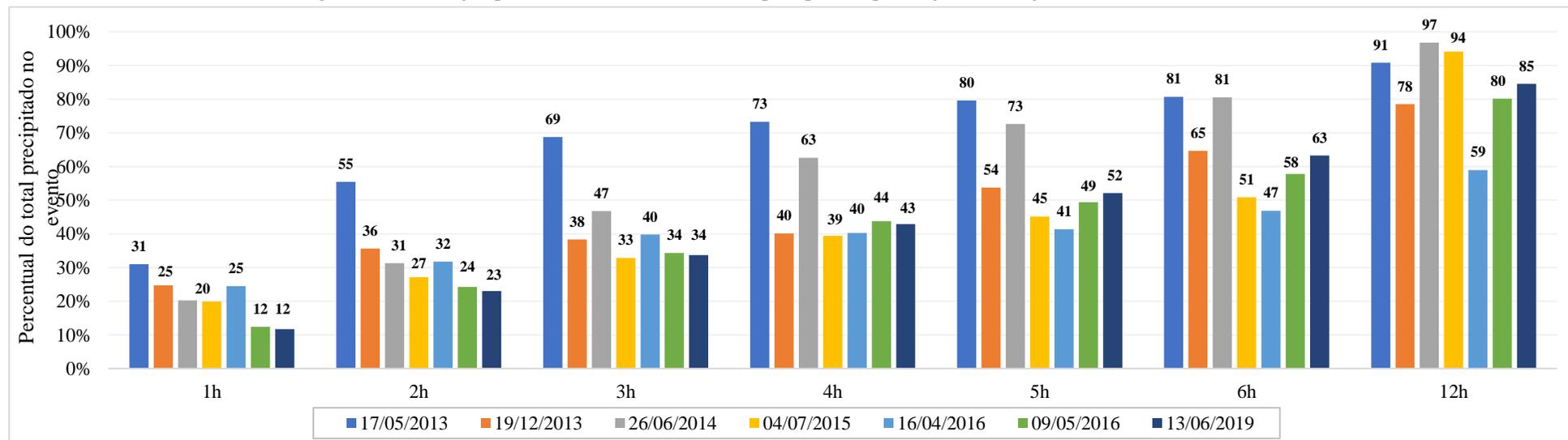
Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

Tabela 4. Caracterização dos maiores eventos chuvosos ocorridos nos cinco anos anteriores a 2020 em Recife.

ANO	EVENTO	PRECIPITAÇÃO MÁXIMA (mm) / DURAÇÕES								MARÉ (Porto do Recife)	
		1h	2h	3h	4h	5h	6h	12h	24h		
2013	17/05/2013	45,2 (07-08:00 h)	81,0 (06-08:00 h)	100,4 (05-08:00 h)	107,0 (04-08:00 h)	116,2 (05-10:00 h)	117,8 (05-11:00 h)	132,6 (01-13:00 h)	146,0	02:26 – 0,9 m 08:47 – 1,8 m	15:11 – 0,8 m 21:28 – 1,7 m
	19/12/2013	27,6 (07-08:00 h)	39,8 (07-09:00 h)	42,8 (06-09:00 h)	44,8 (06-10:00 h)	60,0 (03-08:00 h)	72,2 (03-09:00 h)	87,6 (00-12:00 h)	111,6	04:51 – 2,2 m 10:56 – 0,4 m	17:04 – 2,3 m 23:21 – 0,4 m
2014	26/06/2014	21,6 (08-09:00 h)	33,4 (07-09:00 h)	50,0 (06-09:00 h)	66,8 (05-09:00 h)	77,6 (05-10:00 h)	86,0 (05-11:00 h)	103,4 (03-15:00 h)	106,8	03:00 – 2,2 m 09:24 – 0,3 m	15:26 – 2,1 m 21:38 – 0,4 m
2015	04/07/2015	21,0 (08-09:00 h)	28,6 (07-09:00 h)	34,6 (06-09:00 h)	41,6 (05-09:00 h)	47,6 (04-09:00 h)	53,6 (03-09:00 h)	99,2 (00-12:00 h)	105,4	05:19 – 2,5 m 11:39 – 0,1 m	17:51 – 2,3 m 23:56 – 0,3 m
2016	16/04/2016	27,6 (05-06:00 h)	35,8 (04-06:00 h)	44,8 (03-06:00 h)	45,4 (03-07:00 h)	46,6 (01-06:00 h)	52,8 (00-06:00 h)	66,4 (01-13:00 h)	112,6	00:11 – 1,8 m 06:32 – 0,8 m	12:30 – 1,9 m 19:04 – 0,6 m
	09/05/2016	15,8 (12-13:00 h)	30,8 (11-13:00 h)	43,6 (10-13:00 h)	55,6 (10-14:00 h)	62,8 (09-14:00 h)	73,4 (08-14:00 h)	101,8 (05-17:00 h)	127,0	05:36 – 2,5 m 11:56 – 0,1 m	18:06 – 2,3 m
2019	13/06/2019	19,8 (12-13:00 h)	39,0 (12-14:00 h)	57,0 (11-14:00 h)	72,6 (11-15:00 h)	88,2 (09-14:00 h)	107,0 (08-14:00 h)	144,6 (07-19:00 h)	169,2	00:40 – 2,0 m 06:55 – 0,5 m	13:13 – 2,3 m 19:34 – 0,5 m

Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

Figura 9. Distribuição percentual dos totais máximos precipitados por fração de duração dos eventos considerados.

Fonte: Silva Junior *et al.* (2020).

Outros eventos, posteriores aos eventos analisados anteriormente, também trouxeram grandes impactos na dinâmica da cidade, que acarretaram em alagamentos de vias urbanas e desmoronamento de barreiras, deixando mortos e desabrigados.

No inverno de 2021 (período de junho a setembro), o INMET (2021) relata que o total de chuva na Estação Automática Recife (A301) foi de 663,3 mm, correspondendo a 2,1% abaixo da média dos valores da série (2005-2021) para o período de inverno, que foi de 677,7 mm. Foram 79 dias com chuva no período invernososo, seis dias a mais do que em 2020 (com acumulado do período de 418,0 mm). A maior chuva diária, durante este período, foi de 52,8 mm, registrada no dia 10/08, com uma maré máxima de 2,30 m (DHN) / 1,16 m (IBGE). No mês de maio deste mesmo ano, no dia 14, o Recife registrou uma chuva de 120,8 mm, sendo o 2º maior volume de chuva diário para o mês de maio desde 1961, não superando 122,2 mm (23/05/2005).

Também no mês de maio, nos dias 24 e 25 do ano de 2022, o volume de chuvas acumulado no Recife superou os 250 mm, correspondendo a 78% da média histórica do mês de maio (317,1 mm, com base na Normal Climatológica de 1991-2020). Na oportunidade, as marés máximas e mínimas nos sobreditos dias chegaram a 2,10 m (DHN) / 0,96 m (IBGE) e 0,5 m (DHN) / -0,64 (IBGE), respectivamente, configurando em maré de quadratura. Marengo *et al.* (2023) classificaram as chuvas ocorridas entre 25 e 30 de maio de 2022 como excepcionalmente fortes, atingindo os estados de Pernambuco, Alagoas e Paraíba, ao longo da costa do Nordeste do Brasil. Ainda segundo os autores, a chuva total no Recife entre os dias supracitados foi de 551 mm (140 mm acima da média do mês), com chuvas mais intensas ocorridas em 25 e 28, 100–200 mm e 151–250 mm, respectivamente.

Recentemente, a cidade do Recife parou novamente diante dos episódios de chuvas extremas. A chuva do dia 07 de fevereiro de 2023 provocou uma série de alagamentos em pontos estratégicos da cidade, como a avenida Agamenon Magalhães com o transbordamento do canal Derby-Tacaruna. A chuva deste dia totalizou 122,6 mm durante 24 horas no posto Recife (Codecipe/Santo Amaro), superando a média histórica do mês de fevereiro (317,1 mm, considerando a Normal Climatológica de 1991-2020) e registrou maré máxima de 2,4 m (DHN) no porto do Recife.

Em linhas gerais, observa-se que as chuvas máximas diárias calculadas para o TR de 2 anos (112,5 a 129,0 mm) foram superadas em tempos de retorno menores nos últimos 5 anos, apontando mudança no regime de chuvas da cidade e reforçando a necessidade de atualização das equações IDF.

2.4.2. Ações de mitigação dos impactos e adaptação da infraestrutura de drenagem local

A mudança do clima é um dos desafios mais complexos deste século e, nesta perspectiva, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) aponta a urgência de desenvolver mecanismos institucionais de ação para a adaptação às mudanças do clima nos ambientes urbanos.

Apesar da necessidade iminente, dada a alta vulnerabilidade do Recife, ações e medidas que propiciem uma melhor adaptação da cidade ainda são muito tímidas e baseadas em iniciativas para a mitigação dos impactos. Silva Junior e Silva (2016) relatam que, basicamente, os planos, estudos e legislações até então existentes, discutem a questão das mudanças climáticas ainda de maneira superficial sob a ótica da vulnerabilidade (apresentando projeções climáticas e ações de mitigação), sem estabelecer diretrizes efetivas para o desenvolvimento e implantação de políticas de adaptação.

No que concerne a drenagem urbana, a ideia de adaptar a infraestrutura para os cenários climáticos futuros é um grande desafio, não só diante das peculiaridades urbanísticas e geográficas que o Recife apresenta, mas também pela dificuldade que a gestão do município possui em lidar com os problemas atuais de drenagem. Mesmo com esse cenário, os poucos instrumentos de gestão existentes, que abordam a questão das mudanças climáticas, elencam algumas medidas consideradas adaptativas para a drenagem urbana da cidade (Quadro 2).

Recentemente, discussões de estratégias para adaptação do Recife, frente às mudanças do clima, têm ganhado força no debate de políticas públicas voltadas para a redução dos riscos climáticos futuros. Um exemplo disso é o Plano de Adaptação às Mudanças do Clima, que avaliou a capacidade adaptativa das áreas mais vulneráveis e propondo medidas (estruturais ou não) que diminuam a fragilidade da infraestrutura da cidade aos efeitos climáticos. O horizonte temporal do plano teve como *baseline* o período de 1976-2005 e em relação ao cenário futuro, o período de 2011-2040. Foram utilizados os modelos climáticos regionais selecionados para o Brasil e elaborados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE): Eta-MIROC5 e Eta-HadGem2-ES, para os cenários de emissão e concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) definidos como intermediário (RCP 4,5) e pessimista (RCP 8,5).

Quadro 2. Alguns instrumentos de gestão estadual e municipal direcionados à questão das mudanças climáticas e sua relação com a drenagem urbana.

ESFERA	DOCUMENTO	ANO	RESUMO/FINALIDADE	ESTRATÉGIA	ASPECTOS RELACIONADOS À DRENAGEM URBANA
ESTADUAL Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Lei Nº 14.090/2010: Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco	2010	Elaborar planos de ação que contribuam para mitigação ou adaptação aos efeitos adversos das mudanças climáticas nos diferentes níveis de planejamento estadual e municipal	Mitigação/ Adaptação	A Lei define como estratégias de mitigação e adaptação: <ul style="list-style-type: none"> • Deve-se considerar na Política Estadual de Recursos Hídricos, a questão das mudanças climáticas, definindo áreas mais vulneráveis e as respectivas ações de prevenção, mitigação e adaptação. É válido destacar que a Lei vigente (Nº 12.984/2005), que institui a Política Estadual de Recursos Hídricos em PE, não contempla a abordagem recomendada; • Recomenda-se que sejam realizadas ações periódicas de desassoreamento e/ou alargamento das calhas dos rios costeiros, além do controlar construções em suas margens, visando minimizar os impactos da elevação do NMM; e • Necessidade de planejar ações emergenciais, como a construção de bacias de estocagem em áreas de baixa altimetria, para reduzir os problemas de drenagem nas regiões litorâneas.
	Plano Estadual de Mudanças Climáticas	2011	Fundamentado por ações a serem desenvolvidas em Pernambuco, considerando os cenários de mudança do clima, que favoreçam a capacidade de resiliência dos sistemas naturais e das cidades. É um dos instrumentos da Política Estadual de Mudanças Climáticas. Apresenta metas obrigatórias e gerais de mitigação e adaptação (previstas da Lei Nº 14.090/2010) para o horizonte de 6 anos.	Mitigação/ Adaptação	1. ADAPTAÇÃO: <ul style="list-style-type: none"> • Renaturalização de corpos hídricos e adoção de medidas estruturadoras para redução de enchentes • Estabelecer padrões e índices de permeabilização do solo urbano que garanta a absorção das águas superficiais e recarga dos aquíferos 2. MITIGAÇÃO: <ul style="list-style-type: none"> • Realizar ações periódicas de desassoreamento e ou alargamento de calhas dos rios costeiros • Construir tanques/reservatórios ao longo da costa, para retenção de água evitando os alagamentos
MUNICIPAL Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente	Lei Nº 18.011/2014: Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife	2014	Estabelece instrumentos para a implementação de ações sustentáveis e de enfrentamento ao fenômeno do aquecimento global, a partir do: <ul style="list-style-type: none"> • Aumento da permeabilidade do solo; • Combate à formação de ilhas de calor, através da arborização; e • Estímulo por construções sustentáveis a partir do Programa de Premiação e de Certificação em Sustentabilidade Ambiental, além de obrigar os empreendimentos de grande impacto ambiental a inventariar os gases do efeito estufa emitidos. Como instrumentos da Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife têm-se: <ul style="list-style-type: none"> • Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) • Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas do Recife 	Mitigação/ Adaptação	Dentre os principais objetivos da implementação da sobredita Política, especifica-se a importância de adotar instrumentos e medidas que evitem e/ou reduzam o escoamento das águas pluviais provenientes dos lotes na rede de drenagem, mediante a ampliação da permeabilidade e aumento da infiltração do solo, bem como a contenção, retardo, captação ou reaproveitamento das águas pluviais neles geradas. Neste sentido, para as novas construções na cidade, desde 2015 está em vigência a Lei Municipal Nº 18.112 que prevê: <ul style="list-style-type: none"> • obrigatoriedade da instalação de telhado verde em edificações habitacionais multifamiliares com mais de 4 pavimentos e não-habitacionais com mais de 400m² de área de cobertura; e • construção de reservatórios de retardo ou acúmulo das águas pluviais em lotes acima de 500m², edificados ou não, com mais de 25% de área impermeabilizada. No tocante ao teto verde, a citada Lei ressalta que tal técnica contribuirá para o aspecto paisagístico, diminuirá a ilha de calor, absorverá parte do escoamento superficial e favorecerá o microclima local. Quanto aos reservatórios, a mesma Lei dispensa a sua construção em lotes cujo as águas pluviais não impactam o sistema público de drenagem, desde que comprovado por ensaios de infiltração e percussão geotécnica, além de laudo de vistoria técnica da Emlurb.
	Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)	2016	Apresenta o perfil de emissões do Recife, com o inventário de 2012 e com a projeção de cenário para 2040. A partir deste diagnóstico, estabelece diretrizes para a redução de emissões de GEE, considerando os seguintes setores prioritários: (1) transporte e mobilidade urbana; (2) resíduos e saneamento; (3) energia; e (4) desenvolvimento urbano sustentável. Por fim, consolida as ações de mitigação propostas e apresenta um panorama das cidades no mundo que se colocaram rumo à economia de baixo carbono.	Mitigação	Não há relação direta, porém, sabe-se que a redução e/ou estabilização na emissão de GEE poderá resultar em cenários climáticos futuros mais otimistas, com previsões menos críticas da intensificação nas precipitações e na elevação do NMM (variáveis climáticas que condicionam o funcionamento da rede de drenagem do Recife).
	Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas do Recife	2019	Este Plano, foca na gestão de risco associada ao clima, ou seja, buscar mecanismos e metodologias para que as políticas setoriais (seja na infraestrutura, meio ambiente, recursos hídricos, gestão de risco aos desastres naturais e zonas costeiras, por exemplo) sejam orientadas e busquem adaptação.	Adaptação	O Plano apresenta algumas diretrizes para a gestão adaptativa, frente aos cenários de mudança do clima, orientando medidas (estruturais ou não), baseadas no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife (Emlurb, 2016) e na Lei Municipal Nº 18.112 (Recife, 2015), que podem ser adotadas nas áreas mais vulneráveis da cidade, sem grandes aprofundamentos.

Nota: A principal diferença entre a adaptação à mudança climática e a mitigação é que a adaptação se refere às ações tomadas para reduzir as consequências negativas das mudanças no clima, enquanto a mitigação se refere aos esforços para limitar a emissão de gases de efeito estufa. Fonte: Adaptado de Silva Junior *et al.* (2020).

Os resultados do plano, para os riscos climáticos mais expressivos (atribuídos à inundação por chuvas e à elevação do nível do mar), mostram as regiões mais vulneráveis da cidade. Para o risco de inundações provocadas por chuvas, considerando projeções futuras, os bairros com maiores ameaças são: Mustardinha, Campina do Barreto e IPSEP. Quanto ao risco atribuído ao aumento do nível do mar, as regiões mais vulneráveis apresentam grande concentração populacional, como a zona costeira da cidade (Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa) que possui 11% da população do Recife. Além disso, grande parte da área central do Recife, onde estão localizados importantes equipamentos econômicos e culturais, também se encontra em alto nível de exposição (Recife, 2019).

Além desse plano, Silva Junior *et al.* (2020) relatam que a cidade já conta, desde 2016, com o Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE (Recife, 2016), que define diretrizes para a redução de emissões de GEE e consolida ações para mitigação dos impactos. Ambos os planos são instrumentos da Lei Municipal Nº 18.011 (Recife, 2014) que institui a Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas no Recife.

Suassuna e Ferreira (2015) avaliaram, através de indicadores para os aspectos institucionais, a capacidade de organização em ações de redução de riscos de desastres no Recife, a partir de dados coletados em secretarias municipais e bases do IBGE no ano de 2013. Para as autoras, os resultados positivos do Recife evidenciam a capacidade de organização da Defesa Civil (que desenvolve ações preventivas com o monitoramento de áreas sujeitas à deslizamentos e alagamentos) e o cumprimento da legislação nacional, com relação às obrigações dos municípios susceptíveis à riscos climáticos.

A ANA (2010), no relatório “Os Efeitos das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos: Desafios para a Gestão”, estabeleceu medidas para a adaptação às mudanças do clima, no que tange a drenagem urbana, a partir de um plano de ação para eventos extremos, considerando, por exemplo:

- O uso, em larga escala, de técnicas compensatórias e a inclusão dessas nas regulações municipais: No Recife, a Lei Nº 18.112 (Recife, 2015) define o uso obrigatório de dispositivos de controle como reservatórios ou telhados verdes para novas edificações com áreas de lotes $\geq 500 \text{ m}^2$. Desde o início de vigência da Lei (em 2015) até 2021, Silva Junior *et al.* (2022) relatam que a Emlurb concedeu anuência para construção de 256 reservatórios, permitindo o controle de mais de 10.235 m^3 que seriam lançados diretamente no sistema público de drenagem. Ainda segundo Silva Junior *et al.* (2022), a técnica mais utilizada é o reservatório de retardo, com pouca adesão na instalação de telhados verdes em novas edificações do Recife.

- Sistemas de alerta para eventos hidrometeorológicos críticos: Em Pernambuco, a APAC (Agência Pernambucana de Águas e Climas) realiza o monitoramento hidrometeorológico em tempo real, emitindo boletins de alerta que são divulgados em mídias sociais e no próprio site da instituição. Em Recife, a Prefeitura criou o Centro de Operações do Recife (COP) para orientação da população e contato com a Defesa Civil para emergências provocadas por fatores climáticos, como alagamentos e deslizamentos de barreiras; e
- Ampliação e melhoria do monitoramento das variáveis hidrometeorológicas e a atualização das curvas IDF, utilizadas para o dimensionamento da infraestrutura de drenagem urbana: No âmbito do projeto “Pluviômetro nas Comunidades”, implementado no ano de 2013, instalaram-se 24 pluviômetros semiautomáticos em áreas de risco do Recife (morro e planície), operados pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) e monitorados pela Defesa Civil (Suassuna; Ferreira, 2015). Já as curvas IDF do Recife foram atualizadas em 2016, no âmbito do PDDR. Além da equação IDF, outro ponto a considerar para a drenagem urbana é a variabilidade espaço-temporal das chuvas na RMR. Para Silva (2018b), a análise de ocorrência de chuvas na RMR mostrou que há possibilidades de eventos altamente intensos. Ainda segundo o autor, tais eventos estão susceptíveis a ocorrer anualmente, com potencial causador de deslizamento de terra, alagamentos e transtornos sociais.

Apesar de atualizar a equação de chuva intensa do Recife, para Silva Junior *et al.* (2020) o PDDR não avalia os efeitos das mudanças climáticas na drenagem urbana, apenas foca no diagnóstico do cenário atual, ressaltando as vulnerabilidades e peculiaridades do sistema existente. Ainda segundo os autores, o plano trouxe ganhos de informação sobre a infraestrutura de drenagem, antes pouco conhecida, através dos levantamentos cadastrais de todos os canais e algumas galerias, pontos críticos de alagamentos e propostas de investimentos para o setor. Agora, com o plano elaborado e as ações estruturantes definidas, é mais viável a captação de recursos federais para financiar, junto à Prefeitura, obras mais robustas apontadas pelo PDDR, que poderão solucionar os problemas atuais e reduzir, concomitantemente, os efeitos climáticos futuros.

No Recife, medidas de adaptação com base em estruturas de engenharia convencional ou de pequenas estruturas descentralizadas (David; Cardoso, 2012), já foram executadas, segundo Silva Junior *et al.* (2020): bombeamento e comportas no canal Derby-Tacaruna; drenagem forçada na Av. Dom Hélder, no bairro do IPSEP; reservatório de detenção subterrâneo entre as Ruas Santo Elias e Conselheiro Portela, no bairro do Espinheiro; e

instalação de válvula flap na saída da rede de microdrenagem da rua do Lima, no bairro de Santo Amaro.

Rodrigues e Cabral (2024) citam outras técnicas implantadas por ações governamentais, não-governamentais e da sociedade civil, adotadas no Recife, e que promovem a capacidade adaptativa da cidade aos cenários climáticos, tendo como destaque: o Programa Capibaribe Melhor, que adotou a técnica de relocação da população ribeirinha do riacho Parnamirim para o habitacional Lemos Torres, construído no âmbito do Programa; a adoção de barreiras retráteis auto armazenadas contra inundações⁴ e de pequenos muros (batentes elevados) na porta das residências, para a proteção contra alagamentos, por iniciativa da população, visando aumentar a resiliência das áreas afetadas; e o Fórum Popular do rio Tejipió, que atua na defesa dos direitos, interesses e reivindicações em prol do rio Tejipió e de sua população.

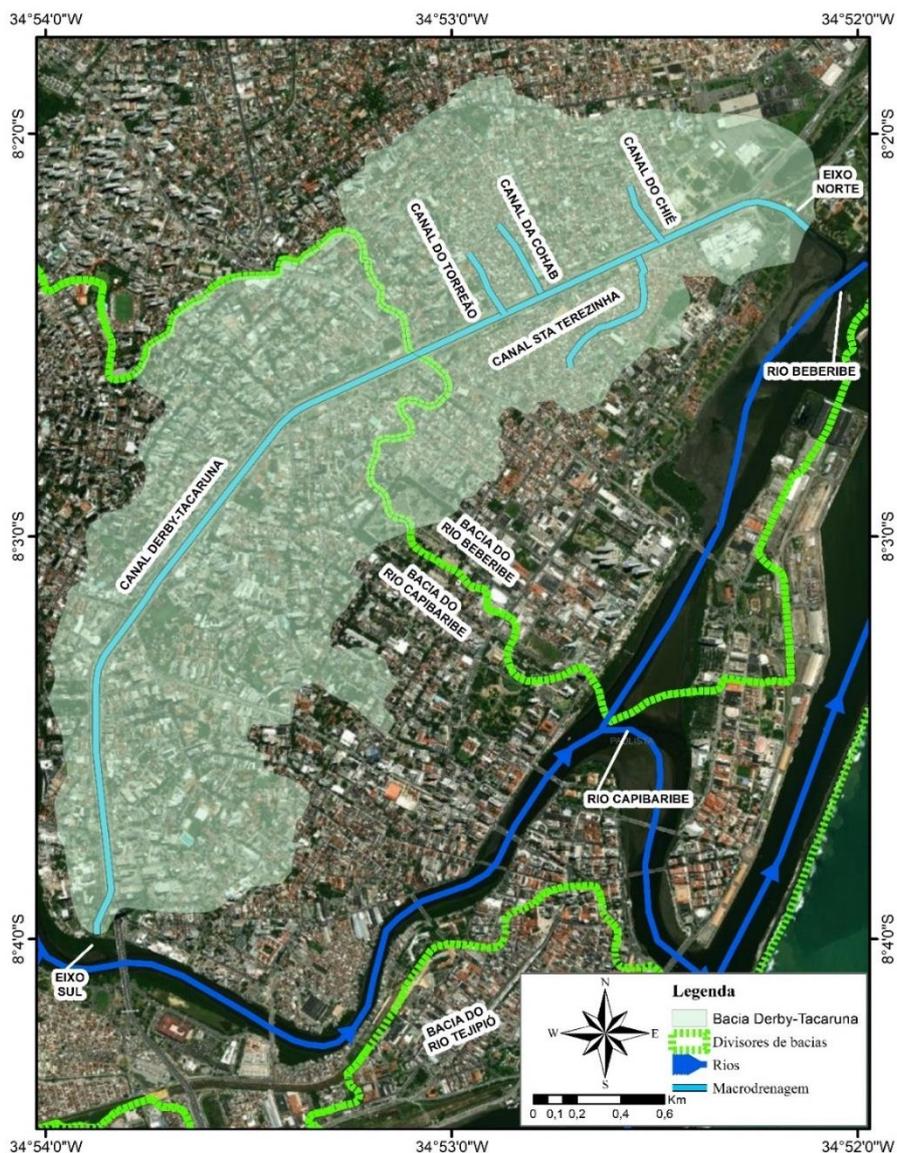
Em 2023, a avenida Agamenon Magalhães, que margeia o canal Derby-Tacaruna, passou por uma requalificação com a inclusão de uma ciclofaixa locada em ambas as margens do canal, totalizando 4 km. Nos pontos mais baixos da via, como no trecho das imediações do Parque Amorim, a ciclofaixa passa sobrelevada formando um pequeno dique lateral do canal, que poderá reduzir os efeitos de um possível transbordamento nas épocas chuvosas.

⁴ Medida de proteção/bloqueio com instalação rápida e fácil nas portas das residências, geralmente de baixo custo, apesar de baixos desempenhos em relação à estanqueidade e níveis máximos de água, principalmente para longos períodos de inundação.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local estudado, a bacia urbana do canal Derby-Tacaruna (Figura 10)⁵, possui uma área de 5,87 km², 14,44 km de perímetro e abrange parte das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe e Beberibe. A maior parte do seu território, 58% (3,42 km²), encontra-se na bacia do rio Capibaribe, enquanto que 42% (2,45 km²) está na bacia do rio Beberibe. Em termos urbanísticos, está inserida nas RPA's 1, 2 e 3, e abrange parcialmente 13 bairros recifenses (Tabela 5).

Figura 10. Localização da área de estudo.



Fonte: O Autor (2024).

⁵ A bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna foi delimitada com as informações topográficas do PE3D, em ambiente SIG, e validada usando o cadastro planimétrico da microdrenagem (ESIG, 2016) e configuração de quadras (ESIG, 2014).

Tabela 5. Caracterização dos bairros parcialmente inseridos na bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna.

Bairros	Área (ha)	Percentual inserido na bacia (%) ¹	Pop. residente / 2010 (hab.)	Nº de domicílios / 2010	Crescimento anual da população (2000/2010)	Rendimento médio mensal dos domicílios
Campo Grande	222	43,1	32.149	9.554	0,29%	R\$ 2.132,00
Torreão	20	100,0	1.083	368	1,87%	R\$ 6.007,59
Encruzilhada	102	28,5	4.008	11.940	2,48%	R\$ 5.692,93
Espinheiro	76	100,0	10.438	3.602	1,60%	R\$ 7.299,96
Aflitos	31	15,1	5.773	1.937	2,80 %	R\$ 1.028,96
Graças	144	12,3	20.538	7.015	1,60%	R\$ 9.484,01
Derby	47	40,3	2.071	656	-0,49%	R\$ 7.785,05
Paissandu	34	65,0	507	180	-0,46 %	R\$ 5.115,06
Ilha do Leite	26	58,7	1.007	361	0,49%	R\$ 3.024,11
Coelhos	43	0,5	7.633	2.322	1,12 %	R\$ 898,41
Boa Vista	176	56,0	14.778	5.999	0,52 %	R\$ 3.618,45
Soledade	32	67,7	2.495	1.013	1,26 %	R\$ 3.747,16
Santo Amaro	380	37,5	27.939	8.474	-0,42%	R\$ 1.892,10

Nota: 1 – Percentuais calculados em ambiente SIG.

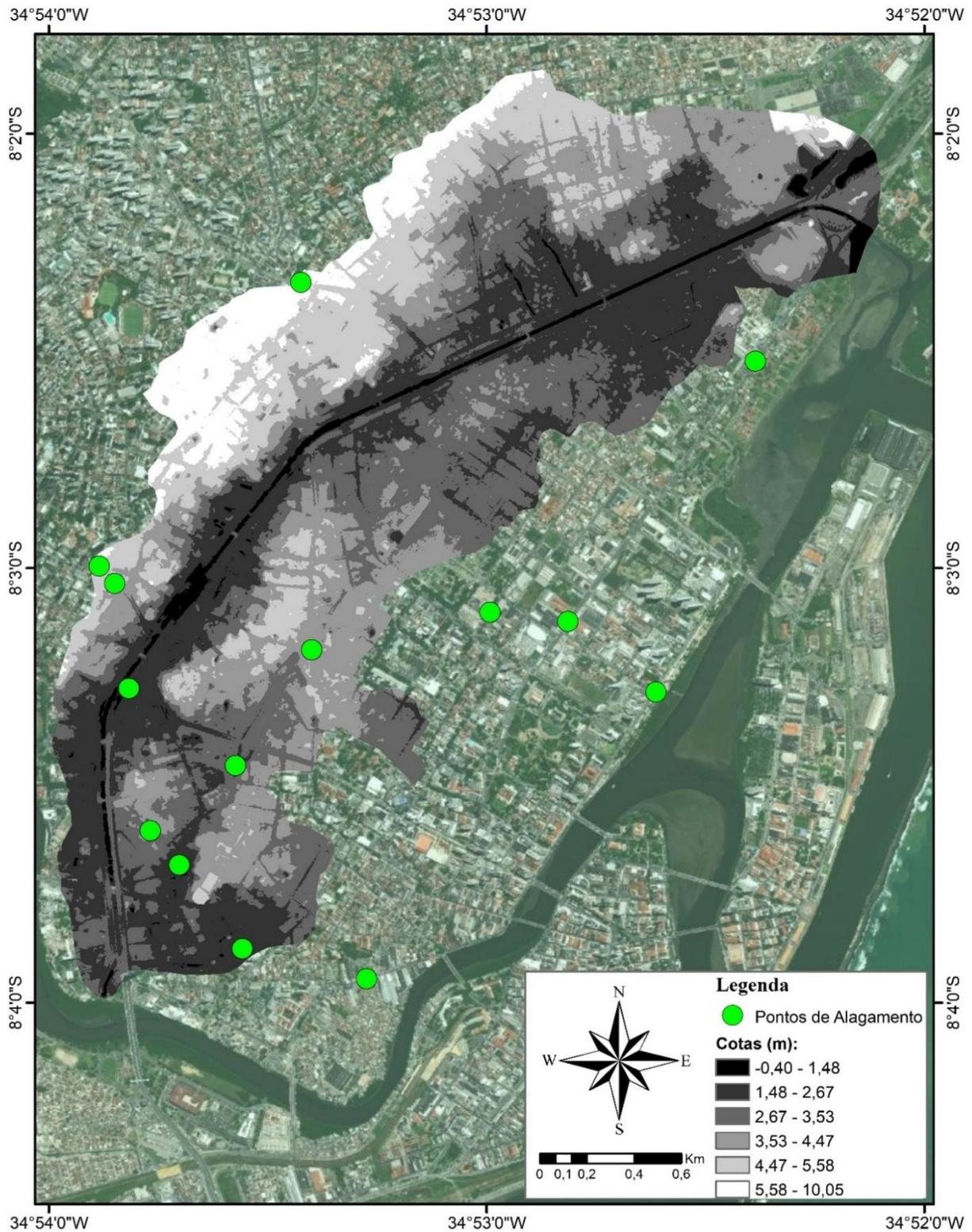
Fonte: IBGE (2010) / Org. pelo Autor (2024).

Quanto à forma, a bacia possui um coeficiente de compacidade (K_c) de 1,68 e fator de forma (K_f) de 0,25, classificando-a como uma bacia não sujeita a grandes enchentes. Possui declividade média do terreno de 4,65%, o que a caracteriza como plana à suavemente ondulada, com variação de cotas entre -0,40 e 10,00 metros e altimetria média de 3,45 m (Figura 11).

Em 2016, a Emlurb mapeou 16 pontos de alagamentos na RPA1 (onde a região leste da bacia do canal Derby-Tacaruna está inserida), sendo 10 situados, apenas, no bairro de Santo Amaro. Boa parte destes pontos estão dispostos em importantes eixos viários do Recife, como: Av. Norte, Av. João de Barros, Av. Cruz Cabugá e Av. Conde da Boa Vista. Em 2018, a Emlurb atualizou o número de pontos de alagamentos, considerando as soluções e intervenções feitas pela Prefeitura, e a bacia do canal Derby-Tacaruna passou a ter 9 pontos, com maioria concentrada ao sul da bacia (Figura 11).

O curso d'água principal é margeado pela Avenida Governador Agamenon Magalhães, que tem uma extensão de 5,60 km (executada em placas de concreto com 30 cm de espessura), ocupa seis faixas de rolamento em cada lado do canal Derby-Tacaruna, e tornou-se o principal eixo de transporte na cidade do Recife. Segundo Cabral *et al.* (2021), a avenida desempenha uma função de via perimetral, circundando os bairros centrais do Recife, além de fazer a ligação da cidade de Olinda e entre os bairros das zonas norte e sul do Recife, incluindo o Aeroporto Internacional dos Guararapes.

Figura 11. Modelo Digital do Terreno da bacia do canal Derby-Tacaruna.



Fonte: O Autor (2024).

A caracterização geológica na bacia do canal Derby-Tacaruna é classificada como terraço marinho indiferenciado e mangue (nas extremidades norte e sul do canal). Segundo Cabral *et al.* (2021), o subsolo ao longo da avenida Agamenon Magalhães apresenta depósito

de argila mole com espessura variando de 3,0 a 22,0 m. Diante destas condições, ao longo dos anos, a avenida Agamenon Magalhães vem apresentando recalque/subsidência do terreno em alguns trechos, com mais evidência nas proximidades do Parque Amorim, onde estima-se um recalque de 1,50 m desde a execução da via, na década de 60 (Cabral *et al.*, 2021). Ainda de acordo com os autores, o recalque remanescente estimado foi de 3 mm/ano.

A infraestrutura de drenagem principal, ou seja, o curso d'água principal, é o canal Derby-Tacaruna que, segundo a Emlurb (2016) e Cabral *et al.* (2021), do ponto de vista hidráulico é um grande reservatório de forma alongada, com 5,30 km de comprimento, seção trapezoidal a retangular de 45,0 m² (com paredes laterais revestidas) e fundo praticamente plano (sem revestimento), resultando num volume de reservação de 238.500 m³. Tal estrutura, que possui duas saídas (Eixo Sul, perto do Hospital Português, e Eixo Norte, nas imediações do Shopping Tacaruna), liga o rio Capibaribe, próximo ao seu braço morto, ao estuário do rio Beberibe.

Entre os anos de 1998 e 1999, foram construídas, em cada extremidade do canal, comportas do tipo vagão, com acionamento mecanizado, para garantir a perenidade da lâmina d'água e controlar o fluxo das águas, que nas marés altas (iguais ou superiores a 2,10 m/DHN e 0,96 m/IBGE), provocavam transbordamentos nas imediações do Parque Amorim (bairro da Boa Vista), em área com cotas máximas de 1,48 m (IBGE). Atualmente, as comportas são operadas diariamente para fechamento em marés superiores a 1,80 m/DHN e 0,66 m/IBGE, e por problemas operacionais, apenas a comporta do eixo norte encontra-se em funcionamento (Figura 12).

Juntamente com o sistema de comportas, desde o ano de 2008, está em operação um sistema de drenagem forçada na extremidade norte, próxima ao Shopping Tacaruna, visando reduzir os níveis d'água e garantir a eficiência do sistema de microdrenagem das áreas de contribuição ao canal, na ocorrência combinada de chuva intensa e maré alta. Segundo Freitas Filho e Cabral (2020), a estação de bombeamento é composta de três conjuntos motor-bomba do tipo VUPX 0601 60 HZ, diâmetro de sucção de 800 mm, apresentando um rendimento máximo de 77% para uma vazão de 4.850 m³/h e altura manométrica de 3,5 m.c.a. Apesar de possuir três bombas, apenas duas funcionam. Na extremidade contrária, ao sul, próxima ao Hospital Português, existe um projeto para implantação de outra estação de bombeamento, com as mesmas características do executado na extremidade norte, próximo ao Shopping Tacaruna (Figura 12a).

Figura 12. Sistema de comportas e bombeamento. A) Extremidade Shopping Tacaruna (Eixo Norte); B) Extremidade Hospital Português (Eixo Sul).



Fonte: O Autor (2024).

Apesar de possuir um pequeno divisor, situado no cruzamento com a Av. João de Barros, não há um sentido de escoamento predominante no canal. Isso por que os gradientes hidráulicos que geram tais escoamentos são formados, em condições normais, de modo aleatório, em função das vazões afluentes das galerias pluviais existentes no seu entorno e, em menor escala do ponto de vista hidráulico, dos esgotos que são lançados ao longo de seu caminhamento (Emlurb, 2016; Cabral *et al.*, 2021).

Há quatro pequenos canais que chegam ao Derby-Tacaruna, que são: Santa Terezinha, Chié, Cohab e Torreão. De acordo com Emlurb (2016), tais canais não estão sujeitos a transbordamentos devido ao controle de nível de jusante (com a operação das comportas e do bombeamento). Em contrapartida, apesar das medidas, ultimamente o canal Derby-Tacaruna apresenta transbordamentos nas imediações do Parque Amorim, provocando alagamentos na Av. Agamenon Magalhães quando há chuvas intensas e maré alta, como ocorrido em 25/06/2015 (Estação Porto: 28 mm/h – 7h20 / 8h20; $P_{24h} = 51,4$ mm; Pico de maré = 1,80 m / 10h35) e 02/09/2019 (Estação Porto: 35,8 mm/h – 6h20 / 7h20; $P_{24h} = 63$ mm; Pico de maré = 2,60 m / 5h56) (Figura 13).

Figura 13. Episódios de transbordamentos do canal Derby-Tacaruna. A) 25/06/2015; B) 02/09/2019.

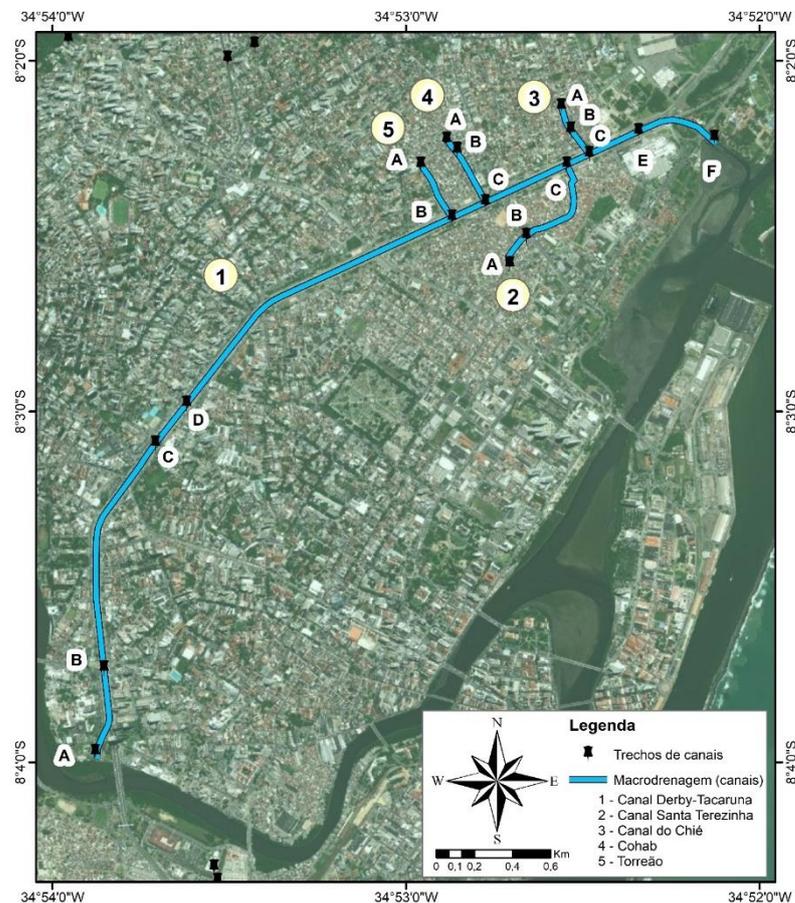


Fonte: NE10 (2015); FOLHA PE (2019).

A Figura 14 mostra a espacialização da rede de macrodrenagem da bacia do canal Derby-Tacaruna (canal principal e os 4 tributários), identificando os trechos com mudanças de revestimento e seção transversal. No Quadro 3 são pontuadas as características físicas dessa macrodrenagem, com relação a geometria, extensão, revestimento (ou não) da seção hidráulica e algumas observações sobre as condições dos canais levantadas durante a execução do Plano Diretor de Macrodrenagem do Recife (PDDR).

Afim de atualizar o levantamento feito no âmbito do PDDR (Emlurb, 2016), em fevereiro de 2022 foram procedidas vistorias técnicas nos 4 canais afluentes ao Derby-Tacaruna, para averiguar: condições de escoamento, estado de conservação e de manutenção da seção hidráulica, interferências na rede, além de obter informações junto aos moradores sobre o desempenho desses canais em épocas chuvosas. A Figura 15 mostra, na sequência de fotos, os principais pontos de fragilidade encontrados nos canais Santa Terezinha, Chié, Cohab e Torreão, como: vegetação nas paredes do canal, presença de resíduos sólidos e esgoto doméstico, e ocupações sob o curso d'água. Todas essas fragilidades já relatadas no PDDR e validadas durante as vistorias. O Quadro 4 reúne as informações/observações obtidas *in loco*.

Figura 14. Macrodrenagem e trechos característicos na bacia do canal Derby-Tacaruna.



Fonte: O Autor (2024).

Quadro 3. Caracterização da macrodrenagem artificial na bacia do canal Derby-Tacaruna.

Canal	Extensão (m)	Dec média (%)	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F
Derby-Tacaruna	5.265	3,30 km – 0,022% (deságue no eixo Sul) 1,96 km – 0,035% (deságue no eixo Norte)	Seção: Retangular Extensão: 490 m Largura: 13,20 m Profundidade: 3,20 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Regular Obs.: Esse trecho possui uma comporta, próxima ao rio Capibaribe, para regularização do seu nível de acordo com o movimento das marés. Não sofre inundações.	Seção: Trapezoidal Extensão: 1.280 m Largura na superfície: 13,50 m Profundidade: 2,30 m Revestimento: Alven. de pedra Cond. revestimento: Boa Obs.: Não sofre inundações.	Seção: Trapezoidal Extensão: 255 m Largura na superfície: 13,50 m Profundidade: 2,80 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Boa Obs.: Sofre inundações no período de maré alta e de chuvas de grande intensidade, podendo se agravar caso as comportas não funcionem.	Seção: Trapezoidal Extensão: 2.810 m Largura na superfície: 13,50 m Profundidade: 3,00 m Revestimento: Alven. de pedra Cond. revestimento: Boa Obs.: Não sofre inundações.	Seção: Retangular Extensão: 430 m Largura: 13,50 m Profundidade: 3,10 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Regular Obs.: A comporta próxima ao rio Beberibe fica nesse trecho e tem a mesma função que a existente no trecho A-B. Não sofre inundações. Desagua na bacia do rio Beberibe, próximo à Escola de Aprendizes de Marinheiro, numa área bastante assoreada.
Santa Terezinha	750	0,133	Seção: Irregular Extensão: 180 m Largura: 4 m Revestimento: Nenhum Obs.: Possui lixo e vegetação em alguns pontos.	Seção: Retangular Extensão: 570 m Largura: 4,50 m Profundidade: 1,80 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Regular Obs.: Possui lixo em alguns pontos.			
Chié	305	0,215	Seção: Retangular Largura: 2,30 m Profundidade: 1,50 m Extensão: 130 m Revestimento: Alven. de pedra Cond. revestimento: Regular Obs.: Vegetação dentro do canal.	Seção: Retangular Largura: 2,80 m Profundidade: 1,60 m Extensão: 175 m Revestimento: Alven. de pedra Cond. revestimento: Regular Obs.: Vegetação brotando do revestimento.			
Cohab	385	0,250	Seção: Retangular Extensão: 45 m Largura: 1,60 m Profundidade: 1,60 m Revestimento: Alven. de pedra Cond. revestimento: Regular Obs.: O trecho possui vegetação no revestimento e lixo em alguns pontos. Não sofre inundações.	Seção: Trapezoidal Extensão: 340 m Largura na superfície: 4,60 m Profundidade: 1,60 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Ruim Obs.: O trecho possui lixo e vegetação acumulados, em alguns pontos. Não sofre inundações.			
Torreão	330	0,157	Seção: Trapezoidal Extensão: 330 m Largura na superfície: 3,50 m Profundidade: 1,50 m Revestimento: Concreto Cond. revestimento: Ruim Obs.: O trecho possui vegetação em seu interior e revestimento e lixo. O canal apresenta alguns problemas localizados e se encontra extremamente assoreado. Precisa de limpeza e tem grande ocupação nas margens. É um canal bem definido e tem problemas com inundações.				

Fonte: Emlurb (2016) / Org. pelo Autor (2024).

Figura 15. Imagens dos canais em fevereiro de 2022: (a) Santa Terezinha; (b) Chié; (c) Cohab; (d) Torreão.



Fonte: O Autor (2024).

Quadro 4. Caracterização dos tributários afluentes ao canal Derby-Tacaruna.

Canal	Caracterização/Observações Levantadas
Santa Terezinha	<ul style="list-style-type: none"> • Não há presença de ocupações irregulares nas proximidades do leito do canal, uma vez o mesmo está margeado por eixos viários (jusante da Av. Dr. Jayme da Fonte). No pequeno trecho de montante, o canal encontra-se tapado. • Em todo o seu caminhamento, o canal apresenta seção hidráulica retangular, com paredes laterais revestidas em concreto; • Em alguns pontos do canal, observou-se o lançamento de esgoto e a presença de vegetação e resíduos sólidos no leito do canal; • A ligação do canal de Santa Terezinha com o canal Derby-Tacaruna é feita a partir de um bueiro triplo tubular de concreto, com diâmetro de 1,50 m (BTTC 1,50 m); • A drenagem na bacia do canal de Santa Terezinha ocorre superficialmente, através de canaletas de concreto. Também conta com trechos de galerias subterrâneas, principalmente na drenagem da Av. Dr. Jayme da Fonte.
Chié	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupações irregulares confinando e fechando o canal em alguns trechos; • Em todo o seu caminhamento, o canal apresenta seção hidráulica retangular com paredes laterais revestidas em concreto; • Em alguns pontos do canal, observou-se obstrução, lançamento de esgoto, e a presença de vegetação e resíduos sólidos. • A ligação do canal do Chié com o canal Derby-Tacaruna é feita a partir de um bueiro duplo tubular de concreto, com diâmetro de 1,50 m (BDTC 1,50 m); • A drenagem na bacia do canal do Chié ocorre superficialmente, através de canaletas de concreto. Também conta com trechos de galerias subterrâneas, principalmente na drenagem da Av. Gov. Agamenon Magalhães (pista local).
Cohab	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupações irregulares confinando e fechando o canal em alguns trechos; • Em seu caminhamento, o maior trecho do canal possui seção hidráulica trapezoidal, com paredes laterais revestidas em concreto. Num pequeno trecho mais a montante, possui seção hidráulica retangular com paredes revestidas em alvenaria de pedra; • Em alguns pontos do canal, observou-se o lançamento de esgoto e a presença de vegetação e resíduos sólidos no leito do canal; • A ligação do canal da Cohab com o canal Derby-Tacaruna é feita a partir de um bueiro simples tubular de concreto, com diâmetro de 1,00 m (BSTC 1,00 m); • A drenagem na bacia do canal do Cohab ocorre superficialmente, através de canaletas de concreto. Também conta com trechos de galerias subterrâneas, principalmente na drenagem da Av. Gov. Agamenon Magalhães (pista local).
Torreão	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupações irregulares confinando e fechando o canal em alguns trechos; • Em todo o seu caminhamento, o canal apresenta seção hidráulica trapezoidal com paredes laterais revestidas em concreto; • Observou-se o lançamento de esgoto e grande presença de vegetação e de resíduos sólidos no leito do canal; • A ligação do canal do Torreão com o canal Derby-Tacaruna é feita a partir de um bueiro simples tubular de concreto, com diâmetro de 1,00 m (BSTC 1,00 m); • A drenagem na bacia do canal do Torreão ocorre superficialmente, por meio de canaletas de concreto. Também conta com trechos de galerias subterrâneas, principalmente na drenagem da Av. Gov. Agamenon Magalhães (pista local).

Fonte: O Autor (2024).

Durante o processo de ocupação acelerado e não planejado, o Recife perdeu muitos de seus cursos d'água secundários, em função dos sucessivos aterros, e confinou as seções de escoamento das calhas principais, de modo que a capacidade de transporte de águas pluviais foi substancialmente reduzida. Paralelo a isto, a produção de deflúvios foi aumentada pela impermeabilização do solo, trazendo vários problemas em épocas chuvosas.

Historicamente, o canal Derby-Tacaruna era uma antiga gamboa, que fazia a ligação entre os manguezais da região estuarina do rio Beberibe, ao norte, com os manguezais das margens do rio Capibaribe, ao sul. As gamboas não tem uma direção de fluxo definido como os rios e riachos e sua velocidade de escoamento é geralmente muito baixa, dependendo dos níveis de água em cada um dos rios conectados, e do nível da maré (Cabral *et al.*, 2021).

Na década de 60 do século XX, a gamboa foi canalizada e foi construída a avenida Agamenon Magalhães, com aterros na faixa de 3 a 5 metros de altura (Cabral *et al.*, 2021) (Figura 16). Na extremidade norte, Pedrosa (2007) e Emlurb (2016) relatam que, aproximadamente, 30 hectares de mangue foram aterrados, local onde, hoje, se encontra o Shopping Tacaruna e o prédio da antiga fábrica Tacaruna. Na extremidade sul, parte dos manguezais aterrados formaram os territórios dos bairros da Ilha do Leite, Ilha do Retiro e Paissandu (Figura 17). Na Figura 18 é possível observar como se deu tal processo, tomando como exemplo o bairro dos Coelhos, que já foi uma pequena ilha no início do século XX.

Anos após a construção do canal, começaram a ocorrer extravasamentos da seção hidráulica (provocados pelas chuvas e elevação das marés) e inundações da avenida, sendo necessário recorrer a medidas de cunho adaptativas (já relatadas anteriormente) para mitigar tais problemas. Para Cabral *et al.* (2021), os alagamentos são consequência de diversas causas que se superpõem: a subsidência da pista de rolamento, o aumento da impermeabilização da área de contribuição, o aumento da intensidade das chuvas e a elevação do nível do mar.

A mudança de uso, de habitação para comércio e serviços, iniciada no começo do século XX no bairro do Recife, continuou em meados do mesmo século nos bairros de São José e Santo Antônio, se intensificando na década de 60 na Boa Vista e Santo Amaro e recentemente na Ilha do Leite, bairros inseridos na bacia do canal Derby-Tacaruna.

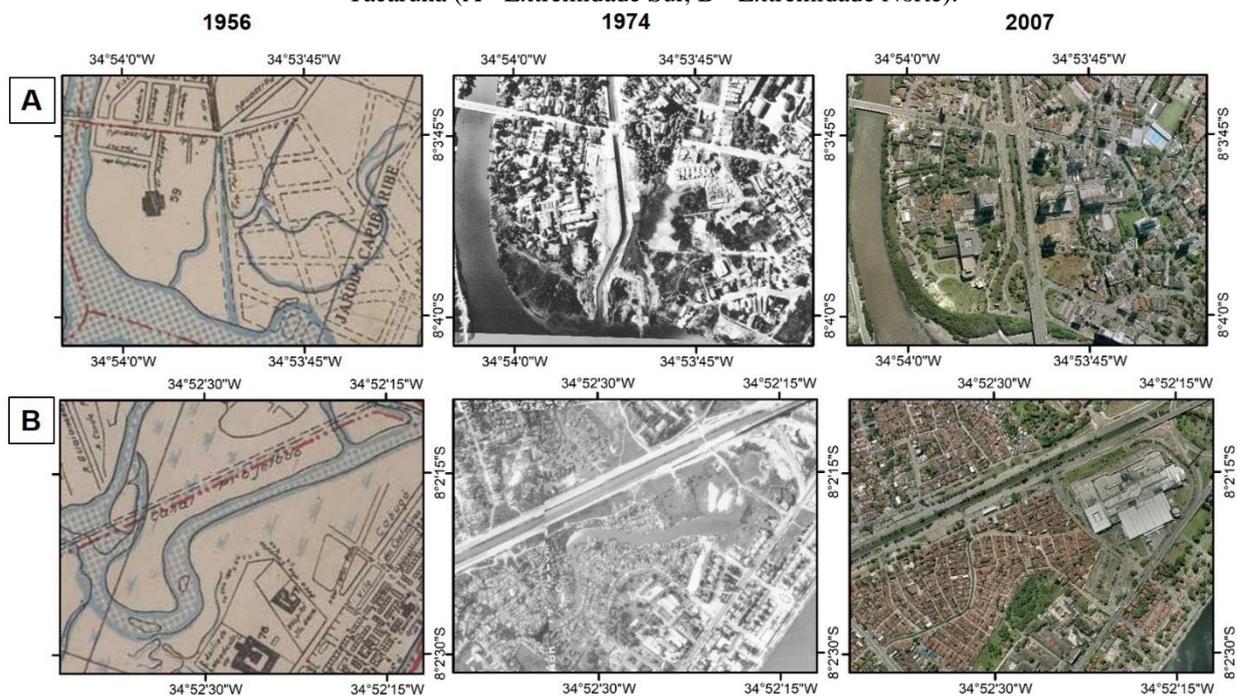
Oliveira, Galvêncio e Pimentel (2016) avaliaram a dinâmica urbana e as áreas verdes na RPA 1, região leste da bacia do canal Derby-Tacaruna, verificando uma redução na vegetação de 14,49% (1987) para 12,13% (2011) e um aumento na ocupação do solo de 46,16% (1987) para 55,14% (2011). Ainda segundo os autores, as áreas de vegetação mais preservadas, onde se faz difícil a supressão vegetal visando a mudança no padrão de uso, estão em áreas públicas como o Parque Treze de Maio e o Cemitério de Santo Amaro.

Figura 16. Evolução temporal: de Gamboa à canal Derby-Tacaruna.



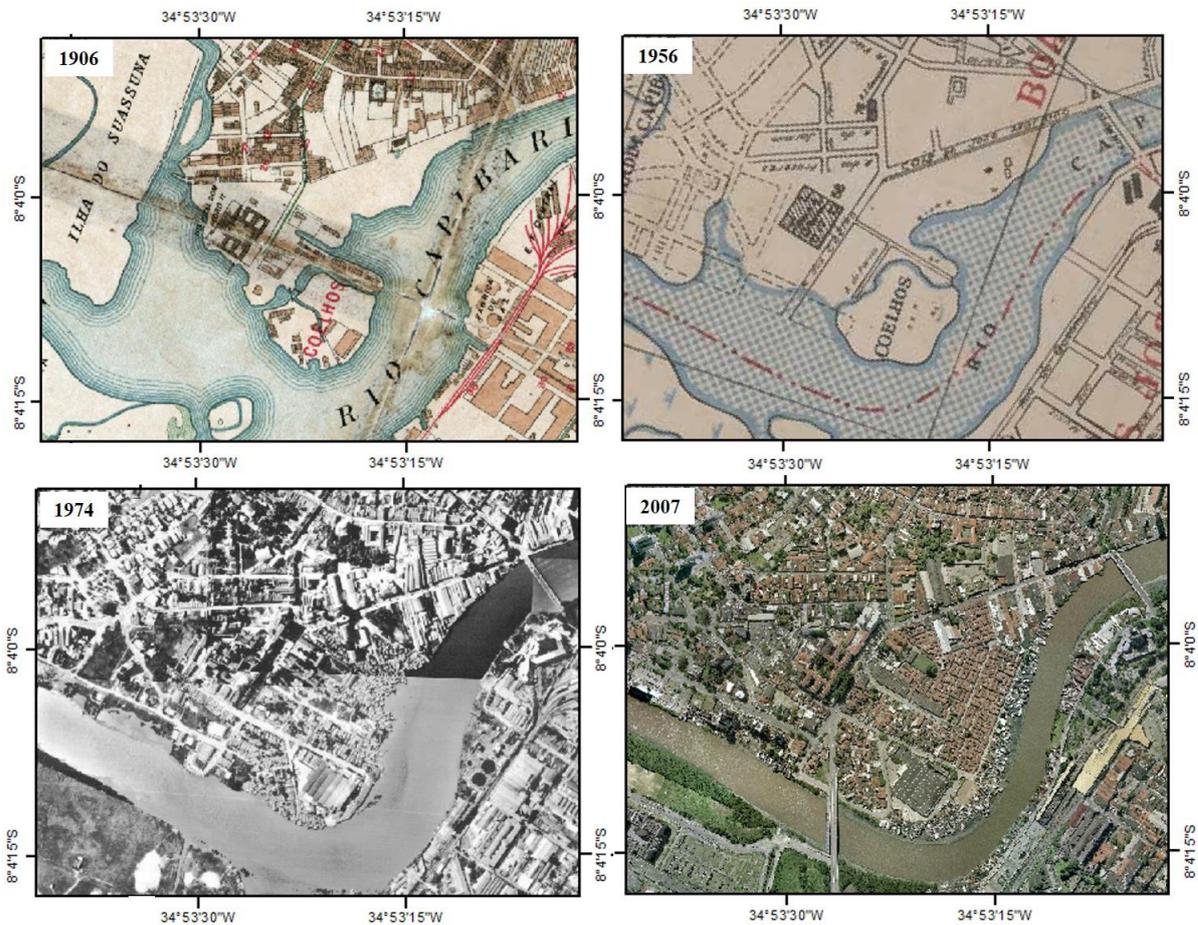
Fonte: Fidem (1956, 1974, 2007) /Org. pelo Autor (2024).

Figura 17. Processo de transformação de curso d'água natural para consolidação nos extremos do canal Derby-Tacaruna (A - Extremidade Sul; B - Extremidade Norte).



Fonte: Fidem (1956, 1974, 2007) /Org. pelo Autor (2024).

Figura 18. Processo de formação e ocupação do bairro dos Coelhos.



Fonte: Fidem (1906, 1956, 1974, 2007) /Org. pelo Autor (2024).

Em termos de manutenção da infraestrutura de drenagem na bacia, em dezembro de 2011 o canal Derby-Tacaruna passou por uma dragagem mista, utilizando escavadeira hidráulica, caminhões e barragem móvel. Este serviço, realizado pela Prefeitura através da Emlurb, teve uma duração de 45 dias. Segundo uma nota técnica cedida pela Autarquia (Emlurb, 2022), nessa dragagem, foram removidos cerca de 5.000 m³ de sedimentos e resíduos sólidos depositados no leito do canal. Antes da dragagem, o canal apresentava uma altura livre para armazenamento de água de 1,20 m, a partir do coroamento da borda. Após o desassoreamento, o canal passou a ter uma altura livre variando de 2 a 2,50 m, em relação ao coroamento das paredes do canal. Isso promoveu uma redução do nível d'água em cerca de 10 a 15 cm nas imediações do Parque Amorim, considerando uma maré de 1,80 m (DHN) sem chuvas, conforme é destacado na Figura 19.

Durante a vistoria técnica, ocorrida no ano de 2022, observou-se que as comportas também precisavam de manutenção, principalmente a do eixo Sul, nas imediações do Hospital Português, que não estava em funcionamento (permanentemente fechada) e possuía uma grande

erosão na estrutura de fundação, que se estendia ao longo das paredes do canal, em ambos os lados. Tal fato poderia estar atribuído ao movimento das marés, causando instabilidade nas paredes do canal. Outra observação é com relação a estanqueidade dessa comporta, que não estava adequada. Com a comporta fechada, durante os eventos de preamar, as águas de maré adentravam o canal por baixo da fundação, afetando a função de bloqueio das marés, além de promover o descalçamento da estrutura, comprometendo a sua estabilidade. No ano de 2024, a Prefeitura, através da Emlurb, realizou os serviços de reparo deste trecho.

Figura 19. Nível d'água no canal Derby-Tacaruna, próximo ao Parque Amorim, para uma maré de 1,80 m com comportas abertas. A) Antes da dragagem (em agosto de 2008); B) Após a dragagem (em fevereiro de 2012).

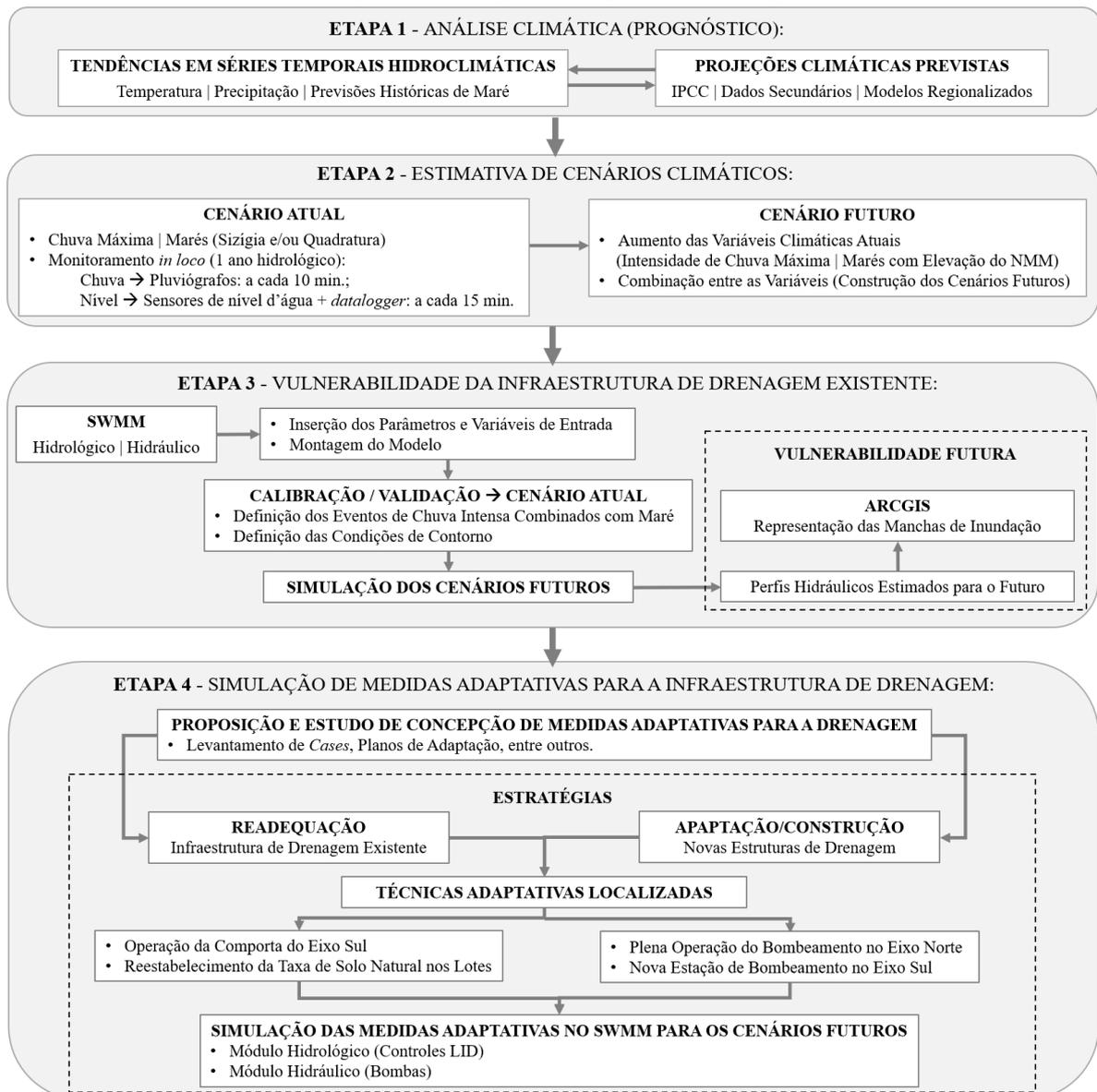


Fonte: Emlurb (2022).

4. METODOLOGIA

A presente Tese contempla uma pesquisa aplicada em campo, definida como estudo de caso. O método da pesquisa, apresentado no fluxograma da Figura 20, foi aplicado na bacia urbana do canal Derby-Tacaruna, anteriormente caracterizada no capítulo 3, visando atender à hipótese da Tese, bem como os seus objetivos.

Figura 20. Fluxograma dos passos metodológicos.



Fonte: O Autor (2024).

Nos tópicos seguintes, serão comentadas as principais informações de cada etapa da pesquisa.

4.1. ETAPA 1 – ANÁLISE CLIMÁTICA (PROGNÓSTICO)

4.1.1. Tendências em séries temporais hidroclimáticas

A metodologia empregada neste item traz uma análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife, utilizando testes estatísticos paramétricos (regressão linear simples) e não paramétricos (Mann-Kendall e Curvatura de Sen). A metodologia descrita a seguir e os resultados apresentados no item 5.1 foram publicados, na íntegra, na “*Revista de Geografia (Recife)*”, no artigo de título “Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação do Recife-PE”.

a) Precipitação e temperatura:

Foram utilizados os dados diários, mensais e anuais de temperatura (máxima, média e mínima) e de precipitação (máxima e total) da estação climatológica “Recife-Curado”, operada pelo INMET, com série histórica entre 1961 e 2017 (obtida em site do órgão). A estação possui coordenadas de -34,95° (longitude) e -8,05° (latitude), com altitude de 10 m e dista um raio de 6 km da área de estudo. A escolha do citado posto se deveu ao tamanho da série (57 anos), à proximidade da área estudada e à condição de estação climatológica, com registros de dados de temperatura.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, onde foram sistematizados e analisados. Na análise exploratória dos dados, foram obtidos os coeficientes de variação (CV) com o intuito de avaliar a variabilidade das séries na escala de tempo definida: $CV \leq 5\%$ baixa dispersão, $5\% < CV < 30\%$ moderada dispersão e $CV \geq 30\%$ alta dispersão. Após isso, a série histórica original foi decomposta em séries parciais com comprimento entre 17 e 20 anos (Guedes *et al.*, 2005), apenas para avaliar as suas médias em relação ao valor médio da série completa (Tabela 6). De acordo com Pinheiro, Graciano e Severo (2013), o tamanho adotado para as séries parciais permite considerar que os processos cíclicos de curto prazo estejam incorporados, assim como, a existência de estacionariedade na série. Para a série completa, a hipótese de estacionariedade não pode ser garantida, diante da possibilidade de existência de tendências e ciclos na sua evolução temporal.

Tabela 6. Composição das séries parciais de dados para a estação climatológica Recife-Curado (57 anos).

Séries parciais	Período de dados	Anos de dados
1	1961-1980	20 anos
2	1981-2000	20 anos
3	2001-2017	17 anos

Fonte: O Autor (2024).

Para a identificação de tendência temporal, utilizou-se as séries históricas completas e aplicou-se o método de regressão linear simples e os testes de Mann-Kendall (MK) e de Curvatura de Sen.

No tocante à análise da regressão, os dados de temperatura e precipitação foram distribuídos graficamente e ajustados ao modelo linear do tipo $y = a(x) + b$, onde: “x” é a variável tempo; “y” é a precipitação ou temperatura; “b” é o valor da reta ajustada para o tempo $t = 0$; e “a” é o coeficiente angular. A tendência da série analisada foi obtida pelo comportamento da reta, onde: $a > 0$ significa tendência positiva; e $a < 0$ indica tendência negativa. Ao realizar esse procedimento, o valor estatístico do R^2 (coeficiente de determinação) reflete a qualidade do ajuste efetuado: $R^2 > 0,60 \rightarrow$ Forte; $0,30 \leq R^2 \leq 0,60 \rightarrow$ Moderado; $R^2 < 0,30 \rightarrow$ Fraco; e $R^2 = 0 \rightarrow$ Nulo (Silva Junior *et al.*, 2020; Fuzzo *et al.*, 2024).

Os testes não-paramétricos e sequenciais de Mann-Kendall e Curvatura de Sen se apresentam como métodos apropriados para a análise de tendências e/ou mudanças em séries temporais de dados (Pinheiro; Graciano; Severo, 2013; Santos; Nishiyama, 2016). Ambas aplicações neste trabalho foram conduzidas pelo *software* estatístico XLSTAT 2018, em versão teste, cuja interface é integrada com planilhas eletrônicas.

Os níveis de significância dos testes aplicados foram de 5% e 10%, caracterizando as tendências em “significante” e “levemente significativa”, respectivamente, como sugere Penereiro e Ferreira (2011). A hipótese nula - H_0 (que indica a não existência de tendência na série de dados) será aceita quando o *p-value* (nível descritivo do teste) da hipótese alternativa - H_a (que revela tendência na série de dados) não estiver dentro do intervalo de confiança estabelecido pelos níveis de significância.

b) Nível do mar / maré:

Diante dos aspectos geográficos (litoral) e altimétricos (baixas cotas) que o Recife tem, o agravamento dos alagamentos nos períodos chuvosos possui relação direta com o remanso e com a entrada das águas de maré alta no seu sistema de drenagem. O acompanhamento das

marés na cidade é feito pelas previsões astronômicas da DHN, uma vez que não há monitoramento no Porto do Recife. A maré no Recife é do tipo semidiurna, com duas preamaras e duas baixa-mares por dia. De acordo com informações prognosticadas nas tábuas de marés, as marés de sizígia no Porto do Recife podem alcançar 2,70 m na preamar e -0,10 m na baixamar, apresentando, assim, uma amplitude previsível potencial máxima da ordem de 2,80 m. É importante lembrar que o nível das marés é tomado em referência ao zero da DHN, que é diferente do zero do IBGE.

A análise dos dados históricos de maré, realizada nesta pesquisa, foram baseadas nas previsões astronômicas da DHN no Porto do Recife (Marinha do Brasil). A série histórica analisada compreende os anos de 2005 a 2017, com intervalo de 6 h entre as alturas máximas e mínimas de maré. Tais dados foram sistematizados e analisados em planilhas eletrônicas, onde foram aplicadas ferramentas de estatística descritiva para a análise exploratória da série. Como produto de análise, foram elaborados histogramas de frequências de marés máximas e mínimas, e de amplitudes de maré: 0,8 m (quadratura) e 2,2 m (sizígia) (Araújo, Mineiro; Cantalice, 2011), a partir de uma distribuição temporal (anual e mensal).

4.1.2. Projeções climáticas

a) Precipitação máxima (eventos extremos):

Os dados de precipitação utilizados foram extraídos dos modelos regionais de circulação atmosférica Eta-MIROC5, Eta-HadGEM-2-ES e Eta-CanESM2 com resolução horizontal de 20 km, para os cenários RCP 4,5 e RCP 8,5, do CMIP5, concordando com o Plano de Adaptação às Mudanças Climáticas do Recife (Recife, 2019). A redução de escala (*downscaling*) foi feita a partir dos modelos climáticos globais HadGEM2-ES (Collins *et al.* 2011), MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010) e CanESM2 (Arora *et al.*, 2011). Para a análise de eventos extremos, utilizou-se o índice RX1day (Tostes; Martins, 2018), que é a quantidade máxima de precipitação em um dia, para cada ano. Os dados utilizados foram obtidos através da plataforma PROJETA (Hölbjg *et al.*, 2018), em formato .CSV, e trabalhados em planilhas eletrônicas. No Brasil, o modelo Eta vem sendo aplicado pelo CPTEC-INPE para previsão do tempo e estudos sobre cenários exploratórios e futuros de mudanças climáticas em diferentes escalas de tempo e resoluções espaciais (De Jong *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2018).

Inicialmente, o desempenho dos modelos climáticos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 foi avaliado pela comparação da precipitação simulada para o clima presente

“baseline” (1961-2005) e projetado (2006-2017) com dados observados na estação do INMET (Recife-Curado) para os mesmos períodos, como sugere Kang *et al.* (2016). Para isso, foi selecionado o ponto do grid de simulação mais próximo da estação para proceder a validação (lat.: -8,00°; long.: -34,99°), distante em 7 km. Na avaliação da precisão dos dados simulados pelos modelos climáticos, foi empregada as seguintes estatísticas, como sugere Sousa *et al.* (2018):

- P_{BIAS} - percentagem de viés (Equação 1), considerando o intervalo de classificação (Van Liew *et al.*, 2007): $P_{BIAS} < 10\% \rightarrow$ Muito bom; $10\% \leq P_{BIAS} < 15\% \rightarrow$ Bom; $15\% \leq P_{BIAS} < 25\% \rightarrow$ Satisfatório; e $P_{BIAS} \geq 25\% \rightarrow$ Insatisfatório.

$$P_{BIAS} = \left| \frac{\sum Obs_i - Est_i}{\sum Obs_i} \right| \times 100 \quad (1)$$

Onde: P_{BIAS} - percentagem de viés;

Est_i - valor estimado da variável para o ponto i ;

Obs_i - valor observado da variável para o ponto.

- EMPA - erro médio percentual absoluto (Equação 2), considerando o intervalo de classificação (LEWIS, 1997): $EMPA < 10\% \rightarrow$ Muito bom; $10\% \leq EMPA < 20\% \rightarrow$ Bom; $20\% \leq EMPA < 30\% \rightarrow$ Razoável; $EMPA \geq 30\% \rightarrow$ Impreciso.

$$EMPA = \frac{1}{n} \times \sum \left| \frac{Obs_i - Est_i}{Obs_i} \right| \times 100 \quad (2)$$

Onde: EMPA - erro médio percentual absoluto;

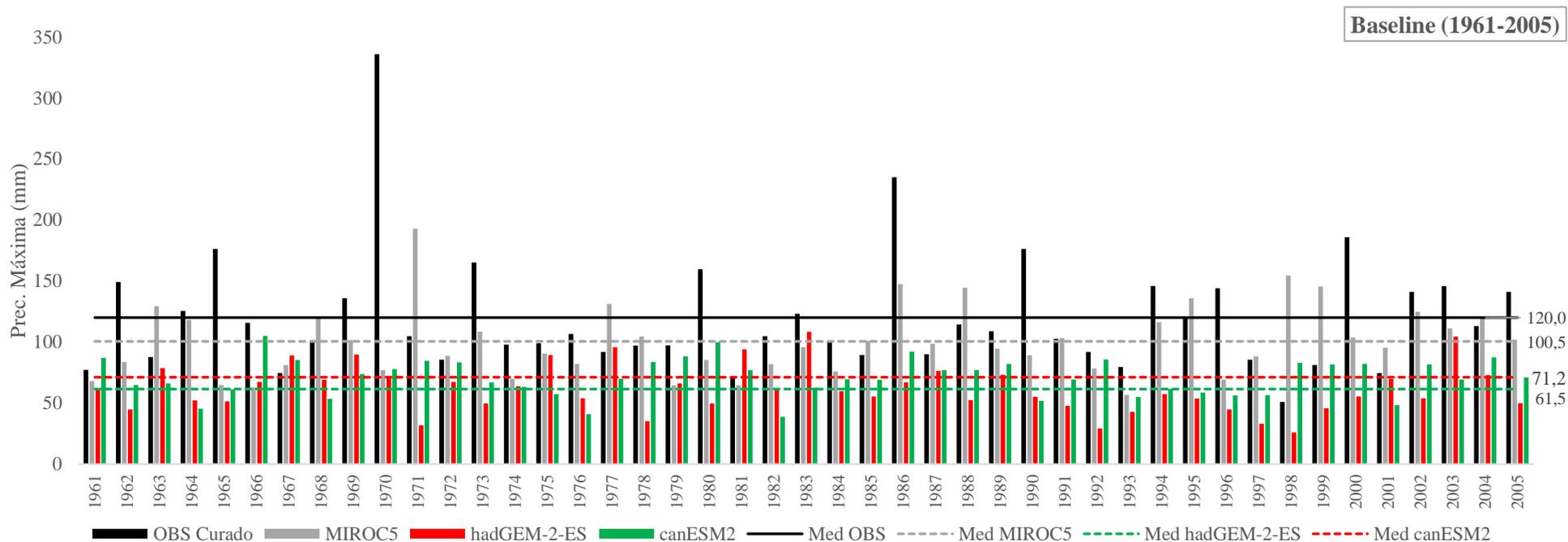
n - número de dados em análise;

Est_i - valor estimado da variável para o ponto i ;

Obs_i - valor observado da variável para o ponto.

A Figura 21 e a Tabela 7 mostram os produtos das aplicações descritas anteriormente, visando a avaliação da qualidade da precipitação simulada pelos modelos climáticos para o clima presente “baseline” (1961-2005). Já na Figura 22 e Tabela 8 são apresentadas as avaliações feitas para as precipitações projetadas para o período de 2006 a 2017.

Figura 21. Precipitação máxima diária anual observada e simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-hadGEM2-ES e Eta-canESM2 no período de 1961 a 2005.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 7. Percentagem de Viés (PBIAS) e Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), para precipitação máxima diária anual simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o período de 1961 a 2005.

Estadística	Eta-MIROC5	Eta-HadGEM2-ES	Eta-CanESM2
P _{BIAS}	16,23%	48,77%	40,69%
EMPA	32,07%	45,34%	37,63%

Fonte: O Autor (2024).

Figura 22. Precipitação máxima diária anual observada e simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM-2-ES e Eta-CanESM2 no período de 2006 a 2017.

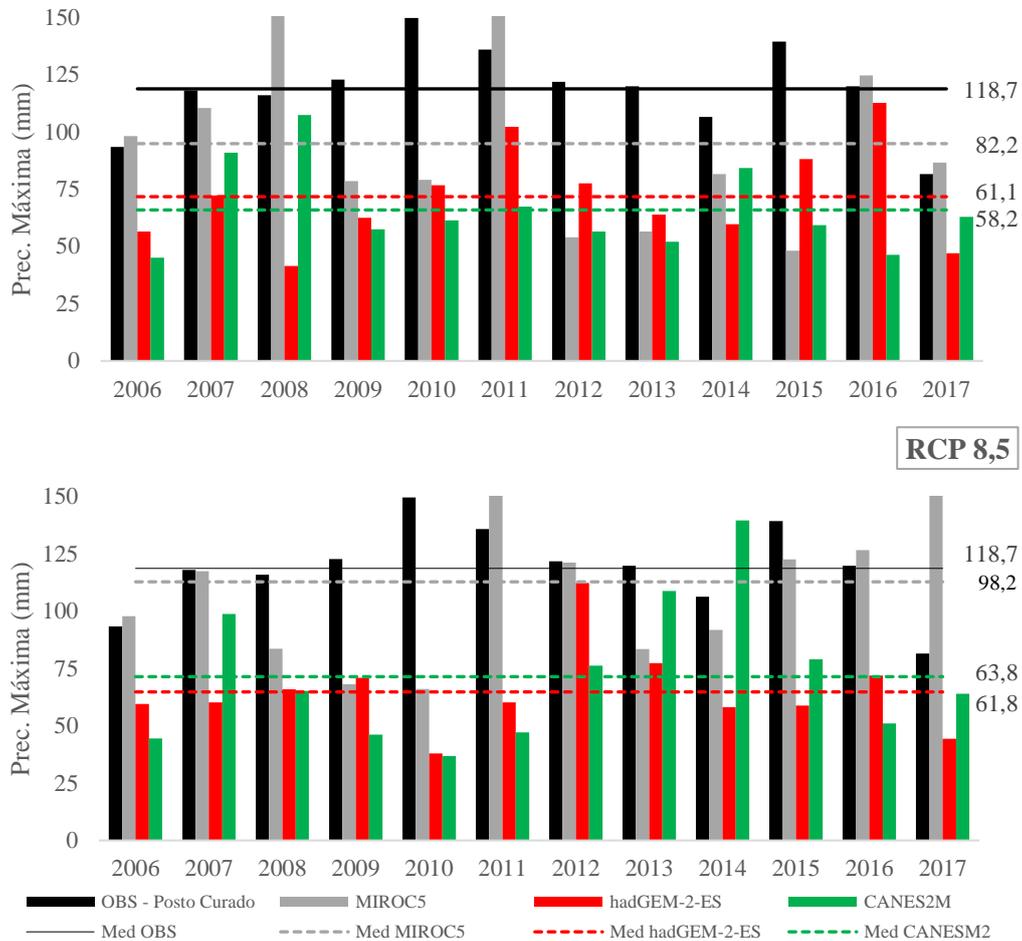


Tabela 8. Percentagem de Viés (P_{BIAS}) e Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), para precipitação máxima diária anual simulada pelos modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o período de 2006 a 2017.

Estatística	RCP	Eta-MIROC5	Eta-HadGEM-2-ES	Eta-CanESM2
P_{BIAS}	4,5	30,82%	48,50%	50,93%
	8,5	17,26%	47,89%	46,27%
EMPA	4,5	33,38%	48,30%	49,62%
	8,5	23,92%	47,80%	44,88%

Fonte: O Autor (2024).

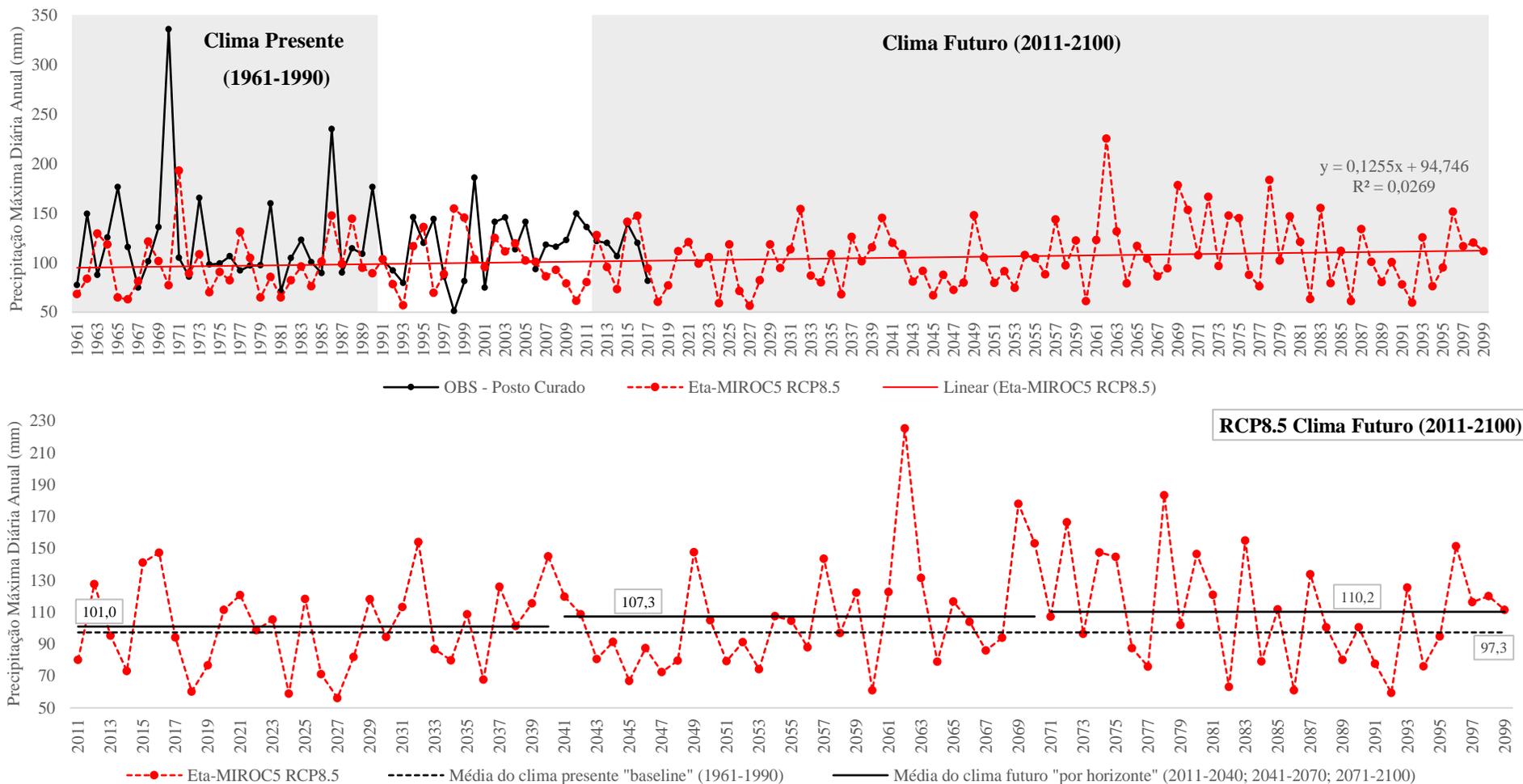
A Figura 21 e a Tabela 7 mostram que as precipitações máximas diárias anuais simuladas pelo modelo Eta-MIROC5 apresentou maior proximidade aos dados observados na estação Recife-Curado, no período de 1961 a 2005. A variável simulada teve valor médio de 100,5 mm, enquanto que a observada 120 mm. Na análise estatística dos dados simulados e

observados, verificou-se que apenas o modelo Eta-MIROC5 apresentou Percentual de Viés (P_{BIAS}) satisfatório (16,23%), porém se mostrou impreciso para o Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA). Para os demais modelos Eta-HadGEM-2-ES e Eta-CanESM2, as análises estatísticas mostraram que as precipitações máximas diárias anuais simuladas foram insatisfatórias e imprecisas.

No cenário RCP 8,5 do modelo Eta-MIROC5 (Figura 22), a precipitação máxima anual média simulada foi de 98,8 mm, enquanto a observada foi de 118,7 mm. A estatística de P_{BIAS} foi satisfatória (17,26%) e o EMPA foi razoável (23,92%), Tabela 8. Com estes resultados, as projeções climáticas para eventos extremos de precipitação (utilizadas nesta pesquisa) se basearão no cenário RCP 8,5, que segundo o Painel Global de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), é o mais pessimista de emissão de CO_2 .

A Figura 23 mostra, no primeiro gráfico, a comparação entre as precipitações máximas diárias anuais observadas (1961-2017) na estação “Curado-Recife” e as projetadas pelo Eta-MIROC5 RCP 8,5 (1961-2100), destacando os horizontes de análise (clima presente: 1961-1990 e clima futuro: 2011-2100). Para a variável simulada, observou-se acréscimo nas alturas de precipitação máxima diária anual ao longo de 138 anos (1961-2100), comprovado pela linha de tendência ascendente e coeficiente angular positivo da equação linear, apesar do baixo valor do R^2 . Ainda na Figura 23, no segundo gráfico, mostra-se apenas a variável projetada para o clima futuro (2011-2100), destacando as médias das precipitações máximas diárias anuais do clima presente “*baseline*” (1961-1990: 97,3 mm) e do clima futuro para os horizontes de: 2011-2040 (101,0 mm), 2041-2070 (107,3 mm) e 2071-2100 (110,2 mm).

Figura 23. Comparação das precipitações máximas diárias anuais observadas e simuladas para o período de referência (*baseline*) e de projeção.



Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 9 apresenta os percentuais médios de aumentos nas alturas de precipitações máximas em 1 dia, a partir da *baseline* (1961-1990) e do cenário mais pessimista (RCP 8,5), considerando os horizontes de 2011-2040, 2041-2070 e 2070-2100.

Tabela 9. Percentuais de aumento para as precipitações máximas de cada horizonte.

Eta-MIROC5 / RCP 8,5	1961-1990	2011-2040	2041-2070	2070-2100
Prec. Máxima Média (mm)	97,3	98,2	107,3	110,2
%	-	0,89	10,25	13,26

Fonte: O Autor (2024).

O incremento percentual nas alturas de precipitação máxima em 24 h, no horizonte de 2011 a 2040 (0,89%), corroborou com o percentual identificado por Waycarbon (2019) para o mesmo período, no âmbito dos relatórios de acompanhamento do Plano de Adaptação as Mudanças do Clima do Recife (Waycarbon, 2019).

b) Nível do mar / maré:

Dentre os quatro cenários apresentados pelo 5º Relatório do IPCC (2014), especificamente do aumento médio global do nível do mar, tem-se que nesta primeira metade de século, a média global estará entorno de 17 a 38 cm, com alterações significativas no final do século, quando a variabilidade prevista está entre 26 cm a 82 cm (Tabela 10). A simulação foi feita com a aplicação direta das cotas previstas pelo IPCC. Foi considerado o cenário RCP 8,5 “cenário pessimista” em concordância com os valores de precipitação máximas projetadas pelo mesmo cenário, o RCP 8,5 (0,38 m e 0,82 m). Vale ressaltar que tais valores foram convertidos em cotas, tomando por base o sistema de referência do IBGE.

Tabela 10. Projeções de aumento médio do nível do mar de acordo com o IPCC.

Cenários	2046-2065		2081-2100	
	Média (m)	Variação (m)	Média (m)	Variação (m)
RCP 2,6	0,24	0,17 a 0,32	0,40	0,26 a 0,55
RCP 4,0	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,63
RCP 6,0	0,25	0,18 a 0,32	0,48	0,33 a 0,63
RCP 8,5	0,30	0,22 a 0,38	0,63	0,45 a 0,82

Fonte: IPCC (2014).

4.2. ETAPA 2 – ESTIMATIVA DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS

A Tabela 11 apresenta os cenários climáticos que foram simulados nesta pesquisa.

Tabela 11. Proposta para os cenários climáticos futuros de simulação.

Cenário	Precipitação Máxima (Evento)	Altura do Nível do Mar
C	ATUAL	ATUAL
F1 (2011-2040)	+0,89%	ATUAL
F2 (2041-2070)	+10,25%	+0,38 m
F3 (2071-2100)	+13,26%	+0,82 m

Fonte: O Autor (2024).

O cenário C é a condição de comparação com as consequências futuras: o modelo simulou as condições de precipitação máxima de um dado evento extremo (no módulo hidrológico – SWMM) e de maré (no módulo hidráulico – SWMM) para a situação atual, sem levar em consideração mudanças do clima. O cenário F1 supõe que haverá, apenas, um aumento de 0,89% nas precipitações intensas (eventos de chuva considerados), sem elevação no nível do mar. Os cenários F2 e F3 levam em conta as duas variáveis, chuva e maré, sendo o cenário F3 o mais crítico para a drenagem urbana da área em estudo.

4.3. ETAPA 3 – VULNERABILIDADE DA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA EXISTENTE

Nesta etapa, foi realizada a modelagem computacional e simulação de cenários, por meio do modelo SWMM, subsidiado pelo prognóstico e definição dos cenários climáticos, representando as condições de elevação de nível do mar e aumento da intensidade de precipitações extremas. Além das informações topográficas e cadastrais da infraestrutura de drenagem urbana existente, foram obtidos os parâmetros e variáveis de entrada para o modelo (dados de chuvas críticas, CN e maré). Com a inserção dos dados levantados e a montagem da rede de drenagem analisada, o modelo foi calibrado e validado para eventos críticos de precipitação extrema e oscilação de maré, caracterizando o cenário atual (Cenário C). A partir disso, foram simulados os cenários futuros (F1, F2 e F3), considerando os horizontes temporais de 2040, 2070 e 2100. Como já dito, nesta pesquisa foi adotada a linha do IPCC, com as precipitações máximas futuras como mais intensas e o nível do mar mais elevado.

O detalhamento deste item 4.3, Etapa 3 desta pesquisa, será feito nos tópicos a seguir.

4.3.1. Obtenção e tratamento dos dados

Para esta fase, algumas informações complementares foram obtidas junto aos órgãos públicos como: secretarias de serviços públicos da Prefeitura do Recife (Emlurb - Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana), agências e entidades estaduais (CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente, APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas, Compesa - Companhia Pernambucana de Saneamento, Condepe/Fidem - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco) e organizações federais (CPRM – Serviço Geológico do Brasil, IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação), entre outros. Em campo, foram identificados, fotografados e mapeados os principais elementos de drenagem da área de estudo. Ainda na etapa de campo, foram procedidas vistorias durante o período chuvoso (chuvas intensas) e com ocorrência de maré alta, a fim de verificar a dinâmica do escoamento superficial da área e definir as condições de contorno para a modelagem computacional.

a) Parâmetros físicos e topográficos:

- *Topografia, delimitação de sub-bacias e discretização*: as informações de altimetria foram obtidas do Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D (Pernambuco, 2016), que foi desenvolvido pelo Governo de Pernambuco. O programa inclui o recobrimento aerofotogramétrico e o perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 25 cm, referenciados no sistema de coordenadas projetadas UTM SIRGAS2000 (24s ou 25s). Além disso, fornece Ortofotos, Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométrica, com resolução espacial de 50 cm e formato GeoTIFF. Com os dados citados, juntamente com o traçado planimétrico da micro e macrodrenagem (ESIG, 2016; Emlurb, 2016) e a configuração das quadras e arruamentos da Unibase do Recife (ESIG, 2014), foram delimitadas 24 sub-bacias ou sub-áreas de contribuição (Figura 25) e, posteriormente, foram determinados os seguintes parâmetros físicos: área, largura, declividade média, percentual de áreas impermeáveis, entre outros, como pode ser observado na Tabela 12. A delimitação inicial das sub-bacias foi feita através do Qgis, com *r.watershed*, para áreas mínimas de 0,5 km², e em seguida, foram procedidos ajustes os critérios de drenagem e arruamentos. Alguns parâmetros físicos foram obtidos pela tabela de atributos e funções nativas do Qgis. A largura representativa das sub-bacias foi obtida através do método

do retângulo equivalente (Equação 3), em função da largura equivalente - L_e (Equação 4) e do coeficiente de compacidade - K_c (Equação 5).

$$W = \frac{A}{L_e} \quad (3)$$

$$L_e = 0,893 \times (K_c \times \sqrt{A}) \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (4)$$

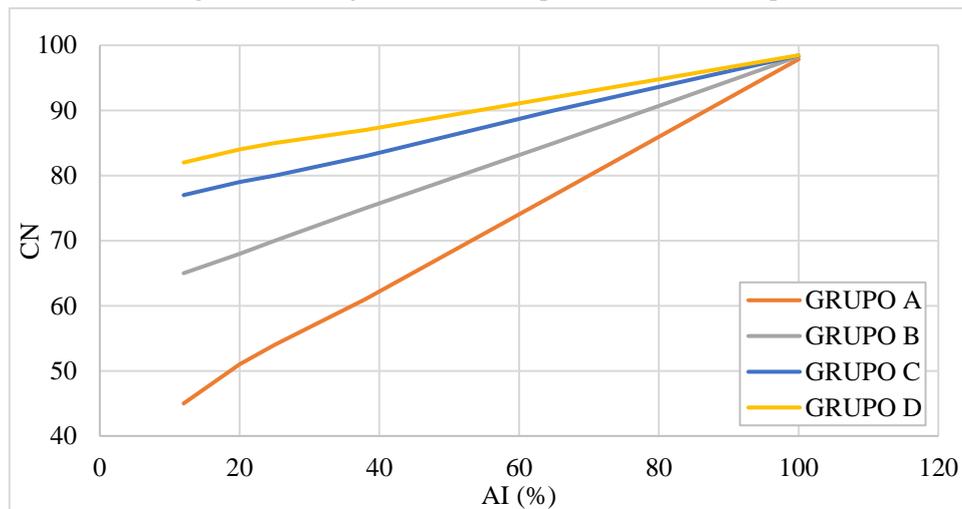
$$K_c = 0,282 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (5)$$

Onde: W - Largura representativa (m);
 A - Área da sub-bacia (m^2);
 L_e - Largura equivalente (m);
 P - Perímetro da sub-bacia (m);
 K_c - Coeficiente de compacidade.

Para obter a declividade média, usou-se a ferramenta “grass gis”, a função “r.stats.zonais”. Na classificação da cobertura do solo, ou seja, para a obtenção do percentual de áreas impermeáveis das sub-bacias, utilizaram-se os dados do Mapbiomas Brasil, para o ano de 2022, disponível em site, contemplando imagens Landsat com 10 m de resolução, processadas no *software* Qgis. As classes utilizadas seguiram as categorias do Mapbiomas, tais como: infraestrutura urbana, mangue, formação florestal, entre outros. Para estabelecer os valores do método CN (*Curve Number*), desenvolvido pelo SCS (*Soil Conservation Service*, 1957), em cada sub-bacia, o PDDR (Emlurb, 2016) orienta que, praticamente, toda a área do Recife possa ser enquadrada no Grupo Hidrológico do Solo C⁶, devido à baixa capacidade de infiltração. Ainda segundo o PDDR (Emlurb, 2016), as áreas residenciais correspondem à quase totalidade do espaço urbano do município e, nesse sentido, os valores de CN puderam ser obtidos no gráfico da Figura 24, relacionando-os aos percentuais de áreas impermeáveis (AI) de cada sub-bacia.

⁶ Solos pouco profundos com camadas subsuperficiais que impedem o fluxo descendente da água ou solos com percentagem elevada de argila (20 a 30%) e baixa capacidade de infiltração, entre 0,40 e 0,15 cm/h (Emlurb, 2016).

Figura 24. Variação de CN com o percentual de área impermeável.



Fonte: Adaptado de PDDR (Emlurb, 2016).

Tabela 12. Caracterização física das sub-áreas de contribuição ao canal Derby-Tacaruna.

Sub-bacias	Área (ha)	Largura Representativa (m)	Declividade Média Superficial (%)	Percentual de Área Impermeável (%)	CN adotado
1	23,6	1320,99	3,8	100,00	98,43
2	11,0	765,20	6,3	100,00	98,43
3	28,5	1137,45	4,5	100,00	98,43
4	20,4	847,98	5,1	100,00	98,43
5	38,8	1465,45	4,7	98,80	98,13
6	28,9	1749,20	5,0	97,81	97,89
7	36,6	1832,32	3,2	100,00	98,43
8	15,0	1030,46	5,1	100,00	98,43
9	18,3	1383,59	5,2	100,00	98,43
10	14,9	805,47	5,2	99,07	98,20
11	31,6	1166,56	4,2	99,66	98,34
12	37,8	1202,03	4,0	99,69	98,35
13	21,3	881,06	4,7	100,00	98,43
14	39,3	1674,24	4,4	100,00	98,43
15	31,4	1481,23	5,0	100,00	98,43
16*	38,1	1090,77	4,7	100,00	98,43
17*	45,2	1488,09	4,6	100,00	98,43
18	8,4	666,52	5,6	100,00	98,43
19*	21,8	1124,29	4,6	100,00	98,43
20*	36,6	1521,59	4,5	98,86	98,15
21	12,9	1056,02	4,8	86,04	95,01
22	9,5	897,35	5,2	98,87	98,15
23	10,2	770,44	7,7	73,88	92,04
24	7,2	631,14	5,8	82,24	94,08
TOTAL	587,3	6240,07	4,65	97,28	97,76

*Nota: SB-16: Bacia do canal do Torreão; SB-17: Bacia do canal da Cohab; SB-19: Bacia do canal Santa Terezinha; SB-20: Bacia do canal do Chié. Fonte: O Autor (2024).

Figura 25. Sub-bacias da bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna.



Fonte: O Autor (2024).

- *Cadastro de macro e microdrenagem*: as informações cadastrais planimétricas e topobatimétricas dos elementos de drenagem urbana do local estudado foram cedidas pela Emlurb, em formato CAD. A composição das informações sobre macrodrenagem é a seguinte: canal Derby-Tacaruna (15 seções transversais); canal do Chié (02 seções transversais); canal do Cohab (05 seções transversais); e canal do Torreão (04 seções transversais). Nos arquivos cedidos, não constava o levantamento das seções transversais do canal de Santa Terezinha. Porém, no diagnóstico do PDDR (Emlurb, 2016), constavam as dimensões/geometria do canal, bem como o seu perfil de fundo. Os dados das seções transversais utilizados estão apresentados no Anexo A. Para a microdrenagem, as informações são escassas e não contemplam toda a área de estudo. O mapeamento realizado recentemente, pelo Plano Diretor de Drenagem do Recife (Emlurb, 2016), abrangeu todo o território da cidade, porém realizou um traçado planimétrico da microdrenagem, sem contemplar as informações de diâmetro/seção dos condutos e cotas de radier dos poços de visita, que são necessários para a modelagem hidráulica da rede. Com essa limitação, a modelagem hidráulica contemplou, apenas, a macrodrenagem da região de estudo, uma vez que o traçado planimétrico da microdrenagem foi utilizado, apenas, para a proceder o processo de delimitação das sub-bacias e/ou sub-áreas de drenagem.

b) Monitoramento hidrológico e de nível d'água:

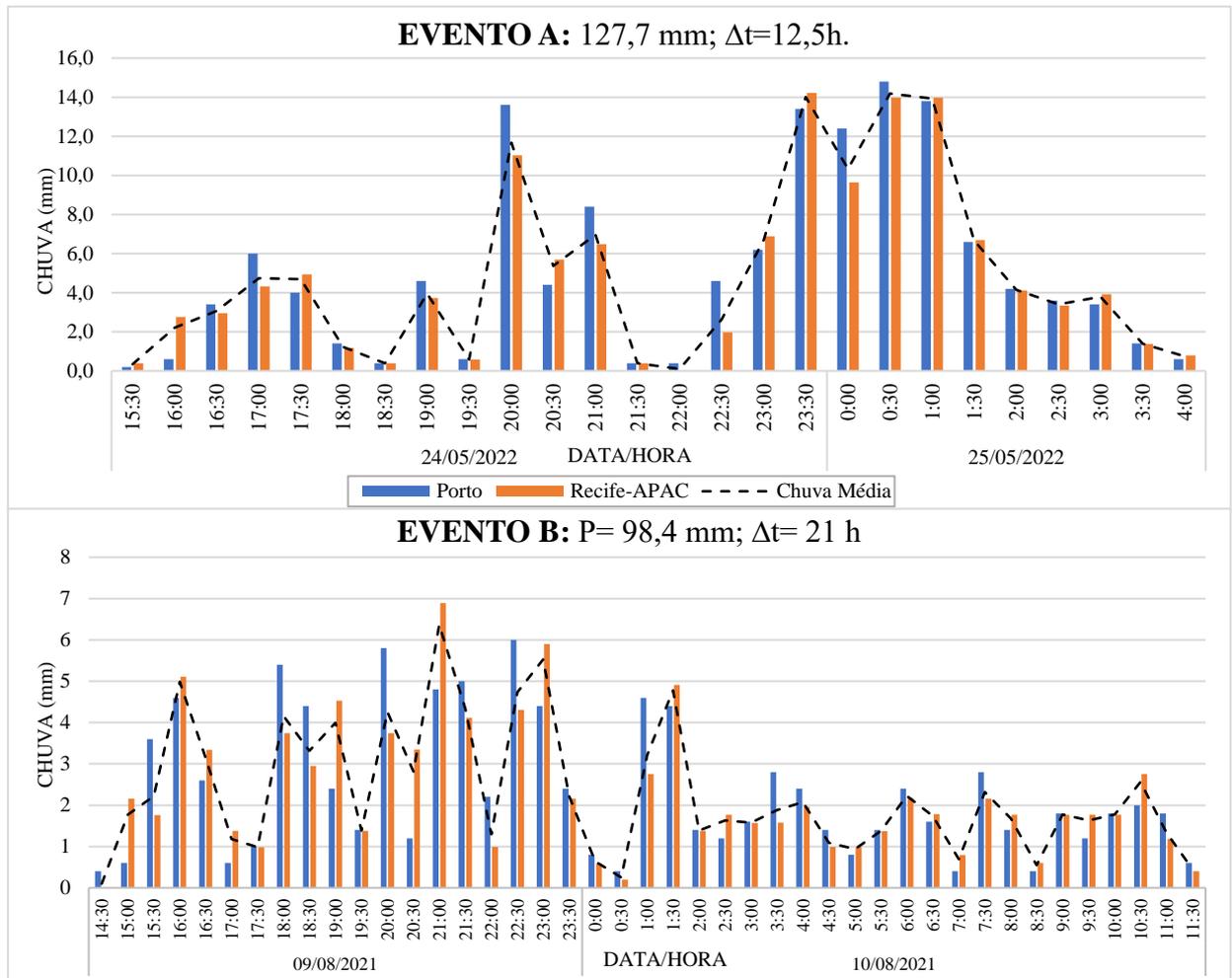
- *Precipitação*: os registros sub-horários de precipitação foram coletados de 2 estações pluviográficas do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais), situadas na área de abrangência do local estudado (Tabela 13) e Figura 29. Dentro da bacia do canal Derby-Tacaruna, existem mais dois pluviógrafos (Torreão – 261160618A e Boa Vista – 261160622A) que não estavam em operação durante os eventos de chuva utilizados nesta pesquisa e, portanto, foram descartados. A área de influência para cada estação foi definida pelo Método do Polígono de Thiessen, em ambiente SIG, afim de definir, na modelagem hidrológica, o pluviógrafo de referência para cada uma das 24 sub-bacias de drenagem. A Figura 26 mostra os hietogramas dos eventos extremos utilizados nesta pesquisa. No total, foram utilizados dois eventos de chuva (A e B), simulados para a bacia em estudo, e suas características encontram-se agrupadas na Tabela 14. Na Figura 27 são mostrados os impactos do Evento A no canal Derby-Tacaruna.

Tabela 13. Estações pluviográficas na área de estudo e entorno.

Código	Estação	Latitude	Longitude	Sub-bacias na área de influência	Área de influência (km ²)
261160620 ^a	Porto	-8,054°	-34,873°	SB-01 a SB-07	1,47
261160623 ^a	Recife – APAC	-8,045°	-34,875°	SB-08 a SB-24	4,40

Fonte: O Autor (2024).

Figura 26. Eventos de precipitação intensa analisados.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 14. Caracterização dos eventos chuvosos analisados.

Informações	EVENTO A	EVENTO B
Período de ocorrência:	24/05/2022 – 15h30 até 25/05/2022 – 04h00	09/08/2021 – 14h30 até 10/08/2021 – 11h30
Precipitação total (mm):	127,7	98,4
Duração (h):	12,5	21
Intensidade média (mm/h):	10,22	4,68
Intensidade máxima (mm/h):	28,37	13,78

Fonte: O Autor (2024).

Figura 27. Evento A no canal Derby-Tacaruna. A) Nas proximidades da Praça do Derby, no dia 25/05/2022 às 06h31; B) Nas proximidades do Parque Amorim, no dia 25/05/2021 às 06h32.



Fonte: O Autor (2024).

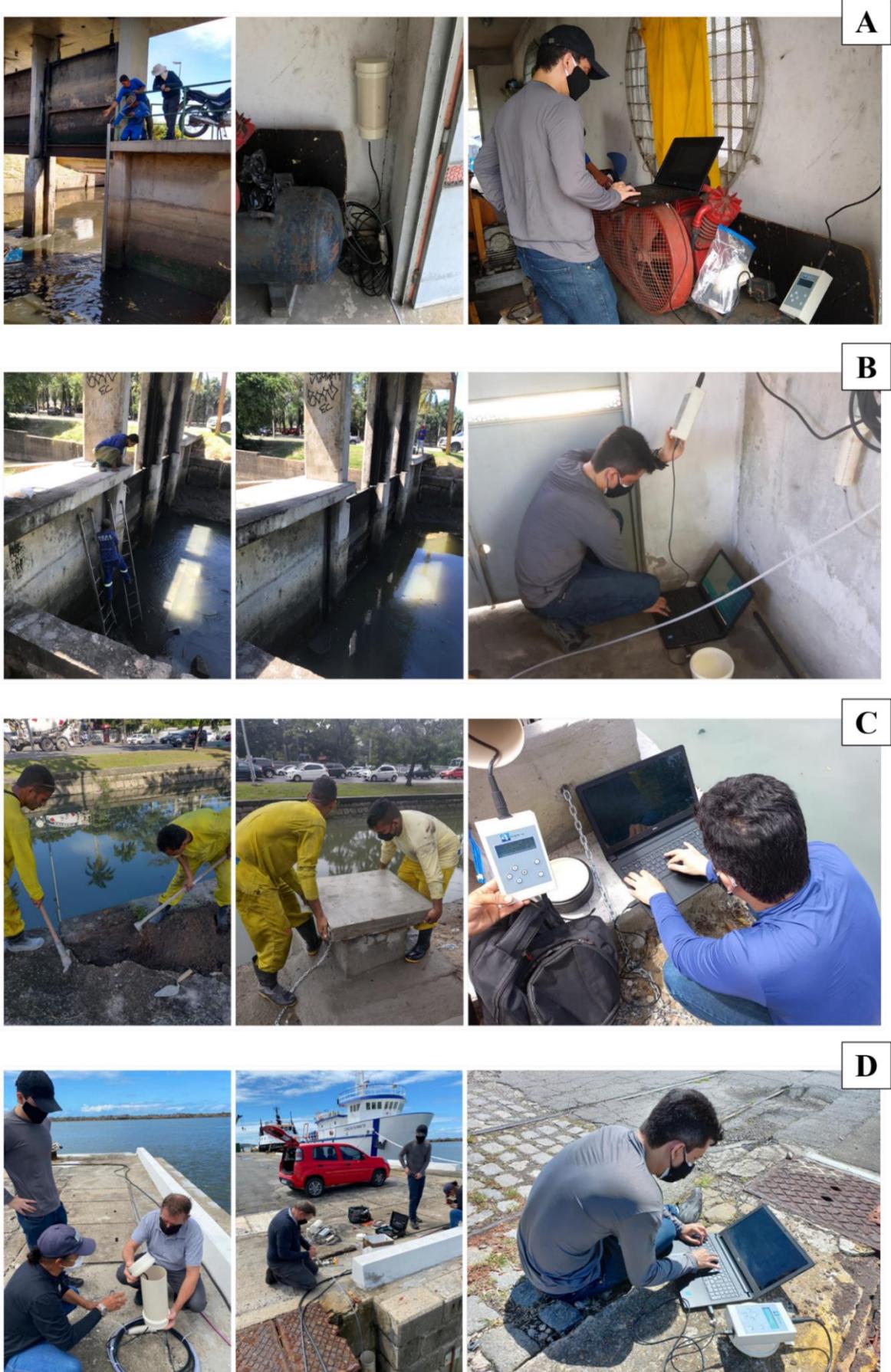
- *Monitoramento limimétrico*: O objetivo do monitoramento foi conhecer a dinâmica hidráulica do escoamento no canal Derby-Tacaruna, e de seus tributários, durante a ocorrência combinada de chuvas intensas e maré alta, além de fornecer subsídios para a calibração e validação da modelagem hidrológica e hidráulica (Ponto C). Também foram monitorados outros pontos (A e B), para condição de contorno da modelagem, e ponto D para verificar/validar os dados previstos pela DNH no Porto do Recife, já que não possui marégrafo. Ao todo, foram monitorados 4 pontos, conforme mostra a Tabela 15 e as Figura 28 e 29. Para este monitoramento, foram utilizados sensores de nível d'água da AMPEQ, com medições de nível d'água realizadas a cada 15 minutos e com registros de dados armazenados em equipamento *datalogger* (Figura 30). Os níveis d'água monitorados nas quatro estações foram georreferenciados aos RN's do IBGE mais próximos, com transferência de cota a partir de equipamento de estação total. Estes resultados foram validados com o equipamento receptor GNSS RTK, também conhecido por Posicionamento Cinemático em Tempo Real, que se trata de uma técnica de posicionamento relativo GNSS utilizada por sistemas como GPS, GLONASS, Galileo e entre outros (Figura 31). O horizonte dos dados contemplou 01 ano hidrológico, entre maio/2021 e maio/2022, e as campanhas de coleta dos registros de níveis d'água e a manutenção dos equipamentos (troca de bateria) ocorriam a cada 15 e/ou 30 dias. Na Estação Porto, o monitoramento foi encurtado (maio/2021 a out/2021), em virtude da maresia local que danificou o sensor e o *datalogger*. Os dados coletados das 4 estações encontram-se tabelados no Apêndice A, com referência do IBGE.

Tabela 15. Descrição das estações de monitoramento de nível d'água.

Ponto	Estação	Lat/Long.	Localização	Objetivo	Início e fim de operação	Responsável
A	Tacaruna	Lat: -8,036° Long: -34,871°	À jusante da comporta do eixo norte do canal Derby-Tacaruna, próximo ao Shopping Tacaruna.	Medição do remanso da maré + verificação da influência do exutório do rio Beberibe.	I: Maio/2021 F: Maio/2022	UFPE/ Emlurb
B	Português	Lat: -8,066° Long: -34,898°	À jusante da comporta do eixo sul do canal Derby-Tacaruna, próximo ao Real Hospital Português.	Medição do remanso da maré + verificação da influência do rio Capibaribe, nas proximidades do seu braço morto.	I: Maio/2021 F: Maio/2022	UFPE/ Emlurb
C	Canal	Lat: -8,053° Long: -34,896°	Dentro do canal Derby-Tacaruna, próximo à EEX-06 Pq. Amorim (Compesa/BRK) e do Parque Amorim.	Medição do nível do canal com a contribuição da bacia + acompanhamento da redução do nível d'água pelo sistema de bombeamento, com comporta fechada, na ocorrência de chuvas.	I: Junho/2021 F: Maio/2022	UFPE/ Emlurb
D	Porto	Lat: -8,056° Long: -34,868°	Porto do Recife, no local do antigo (e desativado) marégrafo.	Medição da variação de maré, e compará-las com as previsões astronômicas do DNH para o Porto do Recife.	I: Maio/2021 F: Outubro/2021	UFPE/ Emlurb/ Porto do Recife S.A.

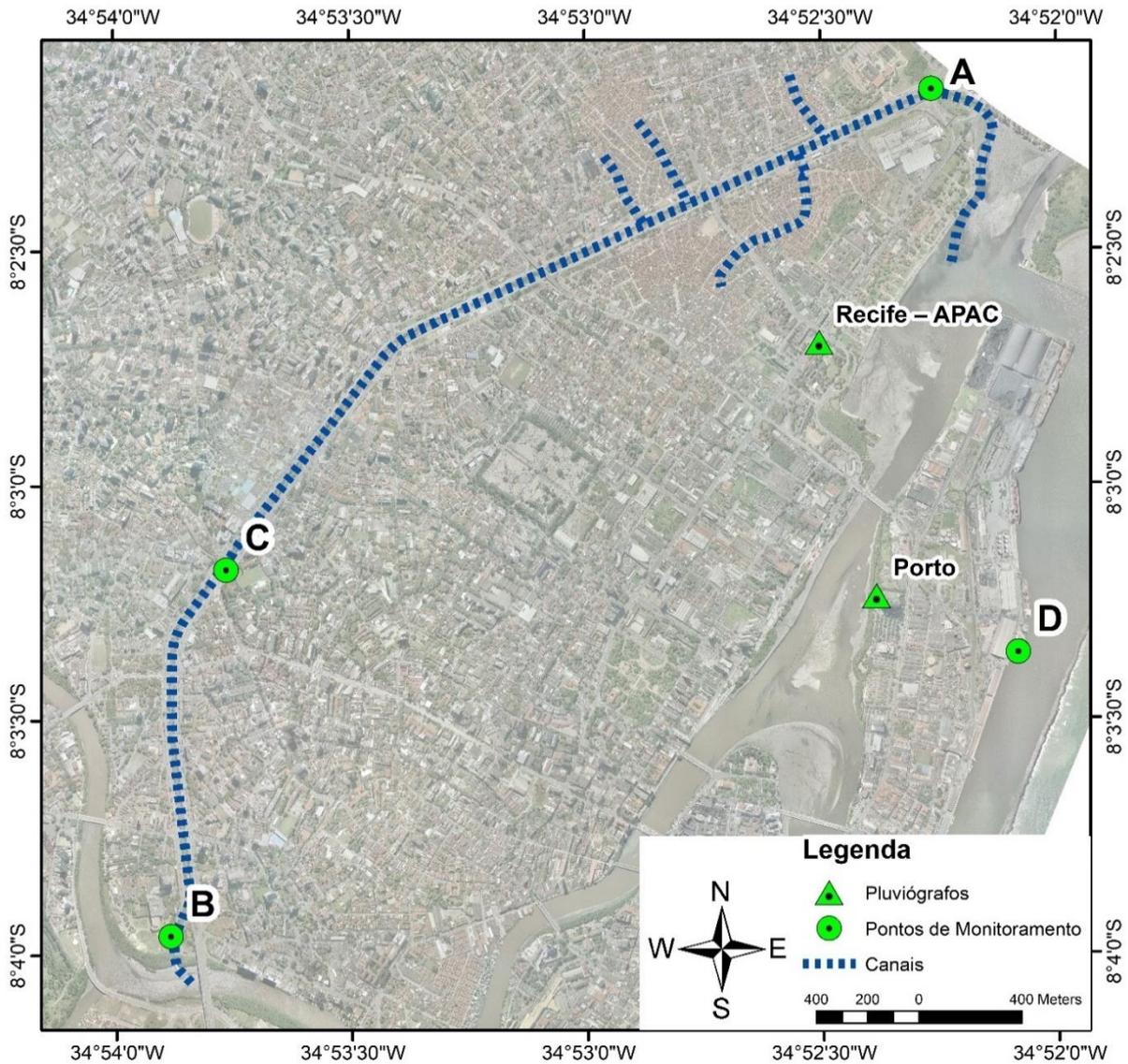
Fonte: O Autor (2024).

Figura 28. Instalação das estações de monitoramento: A) Tacaruna; B) Português; C) Canal; D) Porto.



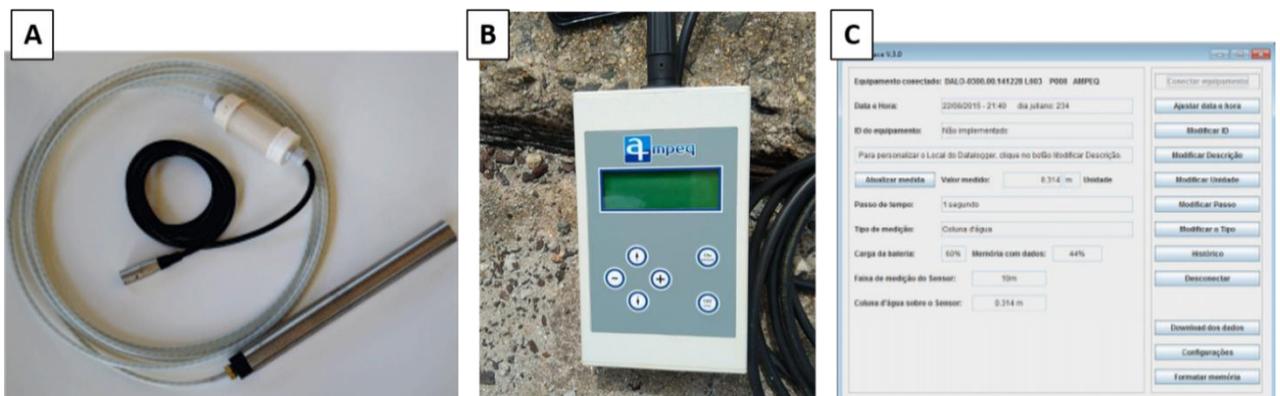
Fonte: O Autor (2024).

Figura 29. Localização das estações pluviográficas e de nível d'água.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 30. Equipamento de medição de nível d'água. A) Cabo e sensor; B) Datalogger; C) Software.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 31. Levantamento topo altimétrico para instalação dos sensores. A) Estação Total; B) Sistema RTK; C) RN IBGE – Porto do Recife.



Fonte: O Autor (2024).

Para validar/verificar/comparar o monitoramento realizado na Estação Porto com as marés previstas para o Porto do Recife, as marés com 2 preamares e 2 baixa-mares diárias (disponíveis em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>) foram interpoladas a cada 15 minutos, coincidentes com o intervalo de medição adotado nas estações de monitoramento. Para isso, foi utilizado o módulo “análise de maré@versão 2016.09.01” do *software* AstGeoTop e gerado o modelo de maré para os anos de 2021 e 2022 (Garnés, 2021; 2022). Os dados interpolados de maré foram cedidos pelo Laboratório de Geodésia do Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura da UFPE. As cotas de marés no Brasil são geralmente referenciadas ao zero hidrográfico da Marinha (Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN), que representa uma diferença de 1,14 m, a menos, em relação ao zero de referência do IBGE (Vasconcelos; Bezerra, 2000), conforme a Equação 6.

$$\text{COTA IBGE} = \text{DHN} - 1,14 \quad (6)$$

Onde: Cota IBGE - valor convertido em altimetria do terreno (m);

DHN - valor na tábua de maré (m).

4.3.2. Modelagem integrada: SWMM (1D) e ArcGis (2D)

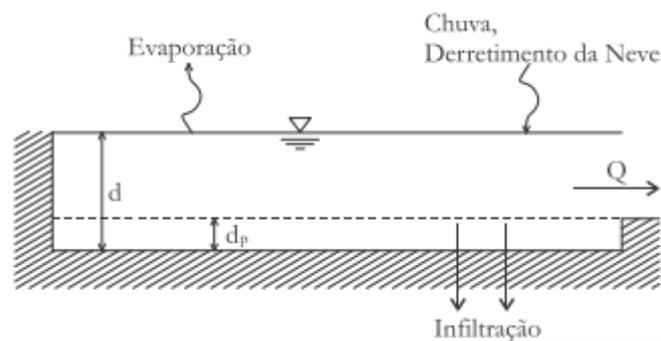
a) SWMM:

Para simular as respostas hidrológicas e hidráulicas da área em estudo, foi utilizado o modelo SWMM v. 5.00.22, desenvolvido pela U.S EPA (*United States Environmental*

Protection Agency) em 1971 (PROCEL-SANEAR, 2012). Trata-se de um modelo dinâmico chuva-vazão, utilizado para a gestão de drenagem urbana, que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas. Pode ser utilizado para simulação de um único evento chuvoso, para uma simulação contínua de longo prazo e para drenagem de águas residuárias (Rossman, 2015; Jiang; Chen; Wang, 2015; Silva Junior, Silva, Cabral, 2017).

A simulação do escoamento superficial (modelagem hidrológica) considera que as sub-bacias se comportem como reservatórios não lineares (Figura 32) a partir da combinação das equações de Manning e da continuidade. Já o modelo de propagação do escoamento (simulação hidráulica) na rede pode ser calculado por: regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica (com as equações completas de Saint-Venant, através do método de Euler modificado) (Garcia; Paiva, 2006; Silva Junior; Silva; Cabral, 2017).

Figura 32. Modelo de reservatório não linear de uma sub-bacia.



Fonte: PROCEL-SANEAR (2012).

O modelo é dividido em vários blocos computacionais diferentes que podem ser simulados separadamente. Dentre estes, para o processo de modelagem na área em estudo, serão simulados os seguintes blocos: o “*Runnof*” na transformação de chuva em vazão; o “*Transport*”, que simula o transporte na rede de drenagem segundo o conceito da onda cinemática; o “*Extran*”, para a modelação hidrodinâmica nos condutos (rede de galerias); e o “*Statistics*” que separa o registro em hidrograma para eventos de chuva independentes, além de fazer os cálculos estatísticos e realizar as análises de frequência (Silva Junior; Silva; Cabral, 2017).

Na representação da Figura 32, a sub-bacia sofre influxo de precipitação (chuva e derretimento da neve) e perdas por evaporação e infiltração. O excesso líquido acumula-se no topo da superfície da sub-bacia até a profundidade “ d ”. A água encharcada acima da profundidade de armazenamento de depressão “ d_p ” pode se tornar vazão de escoamento “ Q ”. O “ d_p ” é responsável por captações iniciais de chuvas, como lagoas na superfície,

interceptação por telhados planos e vegetação e umedecimento da superfície (Rossman; Huber, 2016).

Na conservação da massa, a profundidade “ d ” por unidade de tempo “ t ” é a diferença entre as taxas de entrada e saída na sub-bacia. Nesse caso, a equação diferencial não linear abaixo só é aplicada quando $d > d_p$, caracterizando o escoamento (Rossman; Huber, 2016) (Equação 7):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (7)$$

Onde: i - taxa de precipitação (mm/h);

e - taxa de evaporação superficial (mm/h);

f - taxa de infiltração (mm/h);

q - taxa de escoamento (mm/h);

Os fluxos i , e , f e q são expressos como taxas de fluxo por unidade de área.

No SWMM, o escoamento superficial numa sub-bacia se comporta como um fluxo uniforme dentro de um canal retangular de largura “ W ”, altura “ $d - d_p$ ” e declividade “ S ”. Nesse caso, a equação de Manning é utilizada para calcular a vazão “ Q ” do escoamento superficial, expressa no Sistema Internacional (SI) (Rossman; Huber, 2016; PROCEL-SANEAR, 2012) (Equação 8):

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_x^{2/3} A_x \quad (8)$$

Onde: Q - vazão de escoamento superficial (m³/s);

n - coeficiente de rugosidade superficial (-);

S - declividade média ou aparente (m/m);

$A_x = W(d - d_p)$ = área através da qual o escoamento flui (m²);

$R_x = d - d_p$ = raio hidráulico (m).

Substituindo as expressões definidas para “ A_x ” e “ R_x ” na Equação 8, tem-se a Equação 9:

$$Q = \frac{1}{n} WS^{1/2}(d - d_p)^{5/3} \quad (9)$$

Onde: d - nível de água no reservatório (mm);

d_p - altura do armazenamento em depressões ao longo da bacia (mm);

W - largura da bacia (m).

A obtenção da taxa de escoamento por unidade de área “ q ” é definida pela razão entre a Equação 9 e a área de superfície da sub-bacia “ A ” (Equação 10):

$$q = \frac{1}{An} WS^{1/2}(d - d_p)^{5/3} \quad (10)$$

Onde: A - área da sub-bacia (m²).

Substituindo a Equação 10 na relação de balanço de massa original (Equação 7) resulta na Equação 11:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_p)^{5/3} \quad (11)$$

Onde: α é definida pela Equação 12:

$$\alpha = \frac{1WS^{1/2}}{An} \quad (12)$$

Onde: W - largura da sub-bacia (m);

S - declividade média ou aparente (m/m);

A - área da sub-bacia (m²);

n - coeficiente de rugosidade de Manning (s/m^{1/3}).

A Equação 11 é uma equação diferencial não linear comum. Para valores conhecidos de “ i ”, “ e ”, “ f ”, “ d_p ” e “ α ”, o SWMM resolve numericamente em cada etapa do tempo para a

profundidade ponderada “ d ”. Uma vez que “ d ” é conhecido, os valores da taxa de escoamento “ q ” podem ser encontrados na Equação 11. Como já mencionado, a Equação 9 só se aplica somente quando “ d ” é maior que “ d_p ”. Quando $d \leq d_p$, a taxa de escoamento “ q ” é zero e o balanço de massa em “ d ” é dado pela Equação 13:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad (13)$$

O processo de infiltração no SWMM é simulado por três métodos diferentes: Horton, Green-Ampt e SCS. Qualquer que seja a escolha, os parâmetros do método de infiltração selecionado são altamente dependentes do tipo e da condição do solo a ser infiltrado. Para o emprego da equação de Horton, por exemplo, é necessário obter os parâmetros de taxas máximas e mínimas de infiltração (mm/h) e constante de decaimento (s^{-1}), normalmente obtidos em experimentos de campo. Em Green-Ampt, os parâmetros são: o valor do déficit inicial de umidade do solo (fração), a condutividade hidráulica do solo (mm/h), e o potencial matricial na frente de umedecimento (mm). Para a classificação hidrológica dos grupos de solo, a aplicação do método SCS no SWMM se baseia na Curva-Número (CN) do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) ou o antigo *Soil Conservation Service* (SCS), que classifica os solos entre A, B, C e D, de acordo com a capacidade de infiltração (Rossman; Huber, 2016). É válido ressaltar que a infiltração só é calculada nas áreas permeáveis de cada sub-bacia e que a taxa de infiltração nas áreas impermeáveis (com ou sem armazenamento em depressões) é zero (Nunes, 2017).

Nesta pesquisa, método de infiltração escolhido foi o do SCS, diante da disponibilidade de dados e informações sobre o solo da área de estudo. Os valores de CN de cada sub-bacia já foram indicados no item 4.2, na Tabela 12.

Como já mencionado, os modelos de transportes hidráulicos disponíveis no SWMM são: escoamento em regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica. O modelo de escoamento em regime uniforme consiste em transferir o hidrograma de entrada no nó/junção (poço de visita/seção) a montante do conduto/canal para o nó/junção (poço de visita/seção) de jusante. No modelo, em cada período de tempo, o escoamento é uniforme e permanente (Rossman, 2015; Boldrin, 2014).

O modelo da onda cinemática possibilita que a vazão e a área, no interior do conduto/canal, variem no tempo e no espaço. Isto pode ocasionar o amortecimento e a

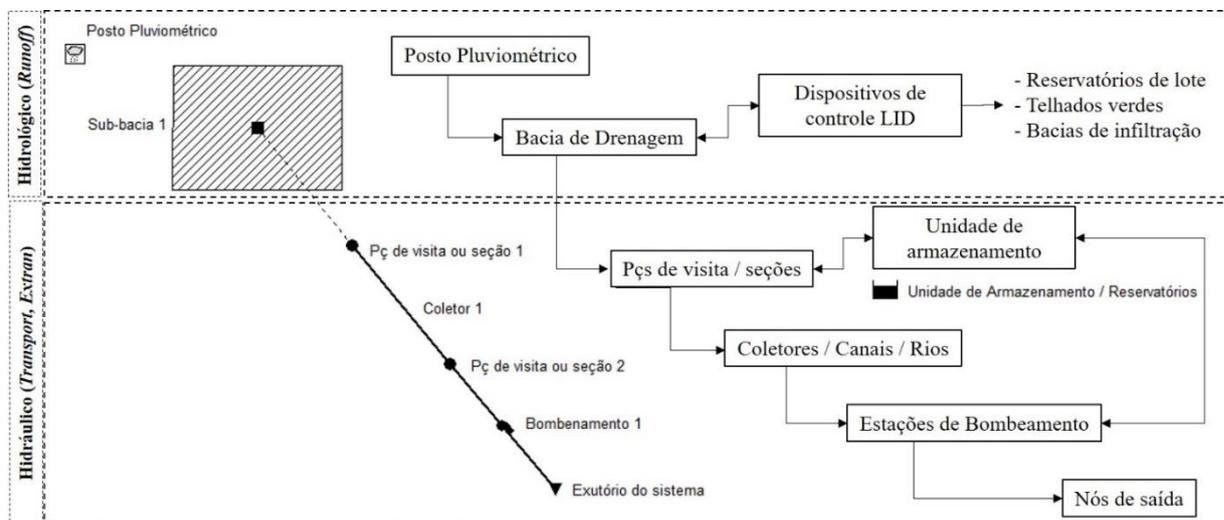
defasagem nos hidrogramas de saída ao comparar com o hidrograma de entrada. Caso ocorra vazão superior à plena no nó/junção (poço de visita/seção), o excesso pode alagá-lo, possibilitando a água retornar ao sistema quando a capacidade do conduto o permitir (Rossman, 2015; Boldrin, 2014).

O modelo de transporte da onda dinâmica calcula simultaneamente os níveis de água no nó/junção (poço de visita/seção) e as vazões nos condutos/canais. Este modelo permite demonstrar o escoamento pressurizado e simular o remanso nos condutos e o transbordamento nos poços de visita (Rossman, 2015; Boldrin, 2014).

Estes métodos de transporte hidráulico utilizam a equação de Manning para relacionar a vazão “ Q ”, a área da seção transversal “ A ”, o raio hidráulico “ R_h ” e a declividade “ S ” para canais abertos e para condutos fechados parcialmente cheios. Para o caso de escoamento permanente e para a análise mediante a onda cinemática, o “ S ” representa a declividade do conduto/canal. No caso do modelo da onda dinâmica, o “ S ” representa a declividade hidráulica do fluxo, ou seja, a perda de carga por unidade de comprimento. Para condutos de seção transversal circular, funcionando em carga, a vazão é calculada pela equação de Hazen-Williams ou pela equação de Darcy-Weisbach (PROCEL-SANEAR, 2012; Rossman, 2015).

Apresentada a visão conceitual do SWMM, bem como as principais equações implícitas para a modelagem hidrológica e hidráulica, a seguir, na Figura 33, mostra-se um esquema analítico dos parâmetros e variáveis de entrada do modelo, e em seguida são descritas as principais etapas de desenvolvimento do processo de simulação.

Figura 33. Esquema analítico do modelo SWMM.



Fonte: O Autor (2024).

- *Parâmetros e variáveis de entrada*: Os parâmetros necessários para a simulação hidrológica-hidráulica da área em estudo são, além das informações de cadastro da infraestrutura de drenagem existente, as características físicas de cada sub-bacia contribuinte a este sistema de drenagem (área, percentual de área impermeável, largura representativa, declividade média, parâmetros de infiltração, coeficiente de rugosidade de Manning e altura do armazenamento em depressões). A obtenção destes dados já foi apresentada no item 4.2 a), e estão reunidas na Tabela 12. Além disso, variáveis como precipitação e maré (como condição de contorno no exutório da drenagem) também são consideradas neste processo, com obtenção descrita no item 4.2 b).

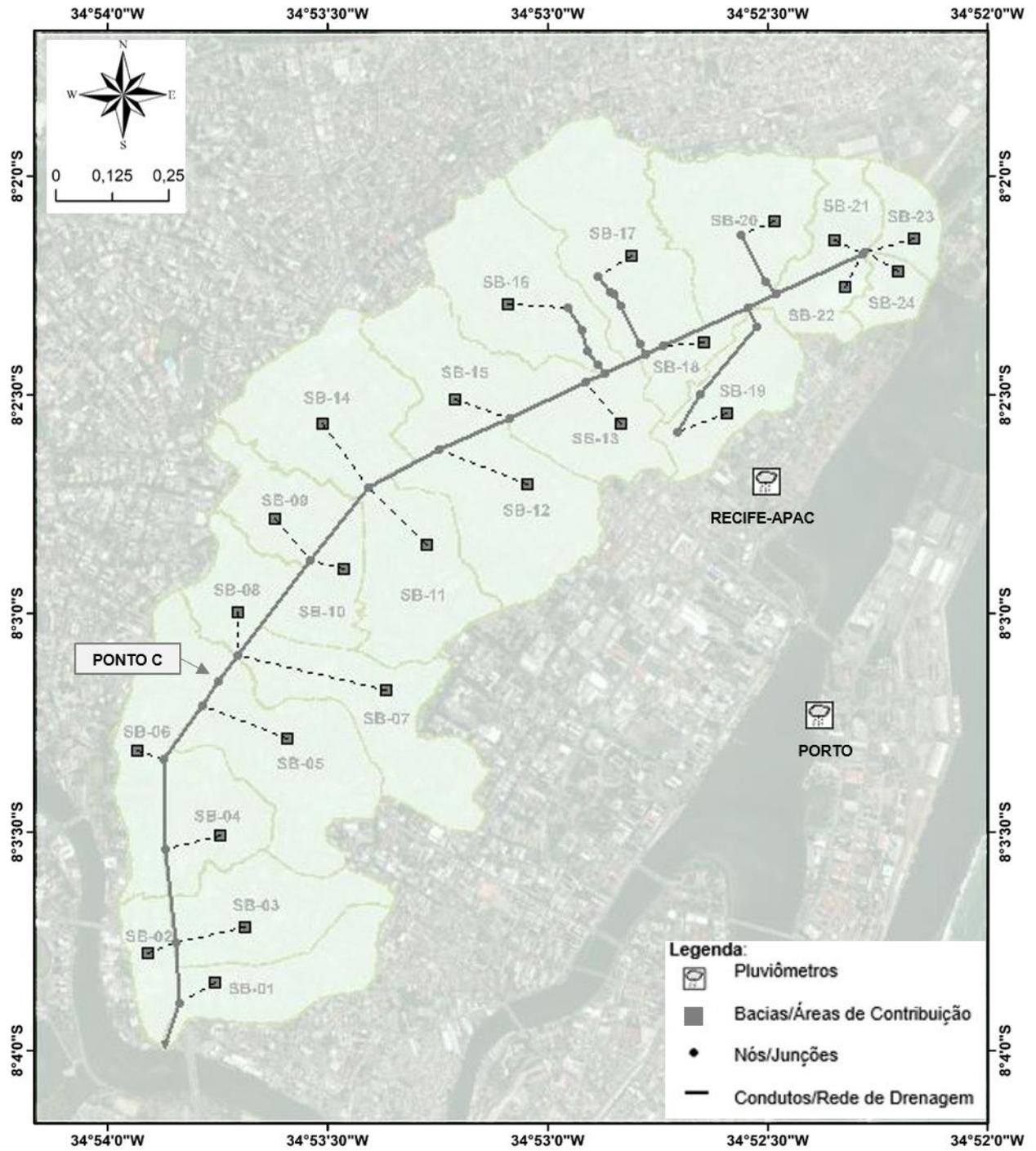
- *Montagem da rede*: Com as seções topobatimétricas da macrodrenagem da bacia do canal Derby-Tacaruna, cuja a obtenção foi descrita no item 4.3.1 b), a rede foi montada no ambiente SWMM com a identificação dos objetos: junções/nós, condutos e seções, atribuindo-lhes geometrias, cotas e extensões dos elementos de drenagem e coeficientes de rugosidade de Manning. A Figura 34 mostra o layout da rede de macrodrenagem, implantada no SWMM, para a bacia do canal Derby-Tacaruna.

Nesta etapa, também foram cadastrados o sistema de drenagem forçada, situado no eixo Norte do canal Derby-Tacaruna, com as especificações e curvas características das bombas, e as comportas em ambas as extremidades Norte e Sul.

Na Figura 35, mostra-se o perfil longitudinal do canal Derby-Tacaruna gerado no SWMM, indicando: o ponto mais baixo (em superfície) na junção/nó “ST9-DT”, que está nas imediações do Parque Amorim; a divisão de fluxo do escoamento na seção hidráulica “ST6-DT”, localizado na intersecção do canal com a Av. João de Barros; e os eixos de cruzamento dos tributários (Torreão – “ST14-TORREAO”, Chié – “ST12-CHIÉ”, STA Santa Terezinha – “ST13-STA” e Cohab – “ST15-COHAB”).

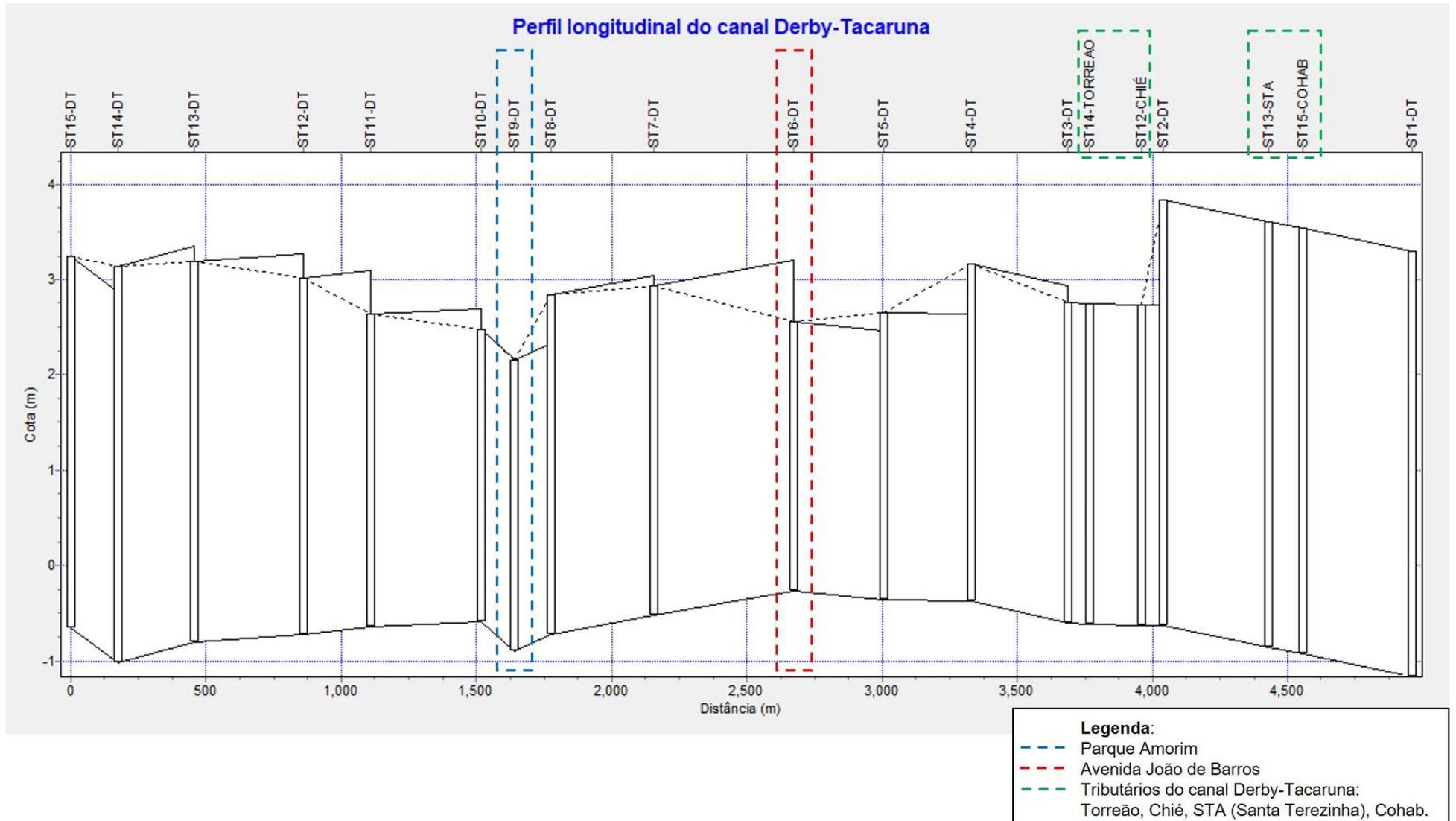
A Figura 36 exemplifica as seções transversais cadastradas no modelo SWMM, mostrando a configuração do canal em dois pontos: nas imediações do Parque Amorim e no cruzamento com a Av. João de Barros. Nessas localidades, observa-se uma geometria mais definida na seção hidráulica revestida, de formato trapezoidal. Tal característica se reproduz em outros trechos, porém há locais com seções hidráulicas em formato retangular.

Figura 34. Montagem da bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna no modelo SWMM.



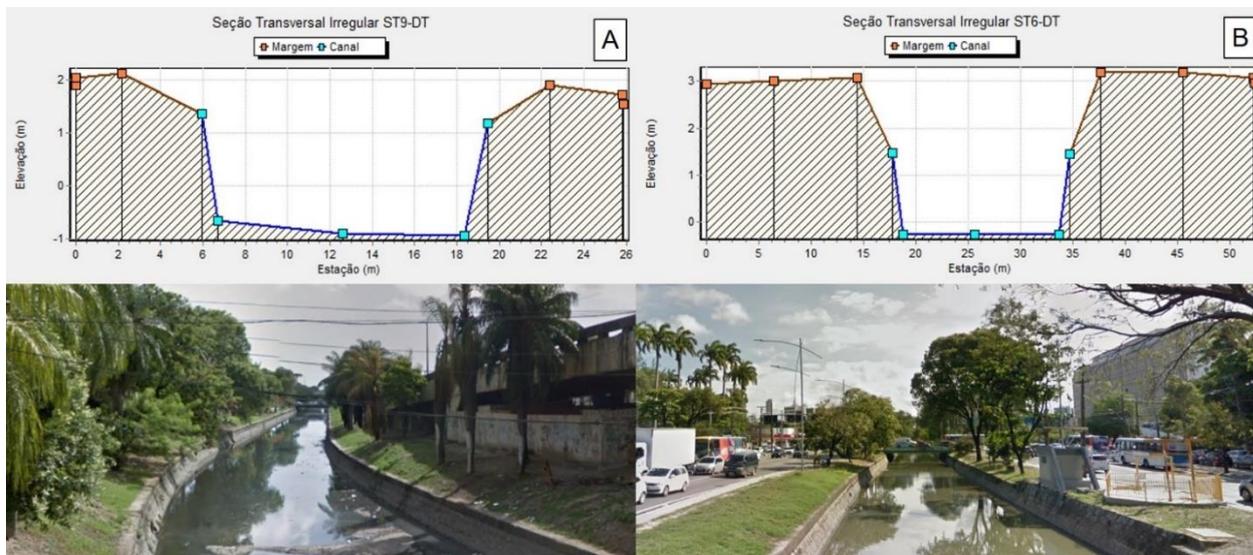
Fonte: O Autor (2024).

Figura 35. Perfil longitudinal do canal Derby- Tacaruna no SWMM.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 36. Seções transversais do canal Derby-Tacaruna implantadas no SWMM. A) Imediações do Parque Amorim; B) Av. João de Barros.



Fonte: O Autor (2024).

Analisando as cotas topográficas da rede de macrodrenagem (cadastrada no SWMM), a Tabela 16 resume, de forma expedita, a dinâmica do nível d'água dentro do canal Derby-Tacaruna e sua influência nos exutórios dos tributários. Percebe-se que para a condição do NA máximo, na seção hidráulica revestida (cota: 1,06 m), os exutórios dos tributários estariam afogados, formando uma barreira hidráulica, mesmo tendo cotas bem acima do fundo do canal (diferença média de 1,0 m).

Tabela 16. Situação do exutório dos tributários do canal Derby-Tacaruna para a condição de NA máximo.

Tributário / Canal	Diferença entre: • cota de fundo do exutório do tributário • cota de fundo do canal Derby-Tacaruna	Diferença entre: • cota máx. do NA no Derby-Tacaruna ¹ • cota de fundo de exutório do tributário	Situação do exutório no NA máx. do Derby-Tacaruna
Torreão	0,36 - (-0,609) = 0,969 m	1,06 - 0,36 = 0,70 m	AFOGADO
Chié	0,533 - (-0,6237) = 1,1567 m	1,06 - 0,533 = 0,527 m	AFOGADO
Sta Terezinha	0,25 - (-0,85248) = 1,10248 m	1,06 - 0,25 = 0,81 m	AFOGADO
Cohab	0,14 - (-0,927) = 1,067 m	1,06 - 0,14 = 0,92 m	AFOGADO

Nota: 1) Cota máxima do nível d'água dentro da seção hidráulica revestida.

Fonte: O Autor (2024).

- *Calibração e validação*: Esta etapa representa o cenário C (condição atual). Com a montagem da macrodrenagem no ambiente do SWMM, a calibração e a validação dos parâmetros utilizaram como referência o monitoramento linimétrico no Ponto C (Estação Canal), conforme descrito no item 4.2 b). Procedendo desta forma, a calibração a ser obtida pode ser definida

como um processo expedito, uma vez que a mesma foi realizada de forma manual, através dos ajustes de:

- Dois parâmetros do modelo hidrológico (coeficiente de rugosidade de Manning e profundidade de armazenamento em depressões, ambos para as áreas permeáveis e impermeáveis de cada sub-bacia), conforme sugere Collodel (2009) e Oliveira (2017); e
- Um parâmetro do modelo hidráulico (coeficiente de rugosidade de Manning na macrodrenagem – canais e rios), como sugere Silva Júnior, Silva e Cabral (2017), Silva (2018a) e Silva (2019). Para isso, foi utilizado como referência a caracterização da macrodrenagem do Quadro 4.

Os valores atribuídos a tais parâmetros variaram dentro dos intervalos apresentados na Tabela 17, sugeridos no manual do usuário do SWMM (Eletrobrás/PROCEL-SANEAR, 2012). Para isso, inicialmente atribuiu-se, como coeficiente de rugosidade de Manning, os valores de $0,15 \text{ s/m}^{1/3}$ (áreas permeáveis) e $0,024 \text{ s/m}^{1/3}$ (áreas impermeáveis), e como altura de armazenamento em depressões, os valores de 5 mm (áreas permeáveis) e 2,54 mm (áreas impermeáveis), como sugere Silva Junior, Silva e Cabral (2017). Em seguida, como parte do processo de calibração, tais valores foram ajustados, sempre atentando aos limites especificados na Tabela 17.

Tabela 17. Intervalos de coeficientes adotados no modelo.

Modelo	Parâmetro	Mínimo	Máximo	
Hidrológico	Coef. de rugosidade de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)	Área impermeável	0,010	0,040
		Área permeável	0,100	0,800
	Prof. de armazen. em depressões (mm)	Área impermeável	1,27	2,54
		Área permeável	2,54	7,62
Hidráulico	Coef. de rugosidade de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)	Canais de concreto	0,012	0,018
		Canais de pedregulho ou enrocamento	0,020	0,035
		Vegetal	0,030	0,400
		Tubulação de concreto	0,011	0,015

Fonte: Adaptado de Eletrobrás/PROCEL-SANEAR (2012).

Foram utilizados um evento de chuva intensa para a calibração (Evento A – 127,7 mm e $\Delta t = 12,5\text{h}$) e um evento para a validação (Evento B), especificados no item 4.2 b). A Tabela 18 mostra uma síntese das variáveis utilizadas para os procedimentos de calibração e validação. As informações de operação da comporta, no Eixo Norte, bem como a duração o possível funcionamento do bombeamento, durante os eventos chuvosos considerados, foram extraídas do livro de registro, cedido pela Emlurb, aonde é detalhado todo o esquema operacional do

sistema. No caso da comporta do Eixo Sul, durante o período de monitoramento, a mesma se encontrava inoperante.

Os resultados deste processo foram representados em gráficos de dispersão entre os níveis “simulados” x “observados” no Ponto C monitorado, resultando em dois gráficos (um de calibração e um de validação). Nos gráficos, foram indicados os coeficientes de determinação (R^2), os quais refletem a qualidade da calibração e validação realizada ($R^2 > 0,60 \rightarrow$ Forte; $0,30 \leq R^2 \leq 0,60 \rightarrow$ Moderado; $R^2 < 0,30 \rightarrow$ Fraco; e $R^2 = 0 \rightarrow$ Nulo). Para que a qualidade do ajuste dos parâmetros na calibração seja satisfatória, outros índices estatísticos também foram avaliados, como: coeficiente de correlação (correl); coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE); P_{BIAIS} ; e EMPA. É válido ressaltar que tais índices, foram aplicados, apenas, ao Evento A de calibração, uma vez que tal evento foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade da bacia do Derby-Tacaruna, frente às mudanças do clima, e na simulação de estratégias adaptativas para a infraestrutura de drenagem.

Tabela 18. Síntese das variáveis utilizadas na calibração e validação.

Etapa	Evento	Condição de Contorno	Nó de Controle: Ponto C
Calibração	Evento A: Prec.= 127,7 mm $\Delta t= 12,5h$ 24/05/2022 (15h30) 25/05/2022 (04h00)	<p>→ <i>Eixo Norte:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Funcionamento da comporta: <ul style="list-style-type: none"> • 24/05 – 15h30 (Aberta) • 25/05 – 04h00 (Aberta) 2) Drenagem forçada (2 bombas de 1 m³/s cada): <ul style="list-style-type: none"> • Não foram acionadas as bombas no período. <p>→ <i>Eixo Sul:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 3) Funcionamento da comporta: <ul style="list-style-type: none"> • Fechada durante o período. 	Comparar níveis simulados com os monitorados no Ponto C, no Evento A.
Validação	Evento B: Prec.= 98,4 mm $\Delta t= 21h$ 09/08/2021 (14h30) 10/08/2021 (11h30)	<p>→ <i>Eixo Norte:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Funcionamento da comporta: <ul style="list-style-type: none"> • 09/08 – 14h30 (Fechada) • 09/08 – 19h47 (Aberta) • 10/09 – 00h10 (Fechada) • 10/08 – 08h05 (Aberta) • 10/08 – 11h30 (Aberta) 2) Drenagem forçada (2 bombas de 1 m³/s cada): <ul style="list-style-type: none"> • Não foram acionadas as bombas no período. <p>→ <i>Eixo Sul:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 3) Funcionamento da comporta: <ul style="list-style-type: none"> • Fechada durante o período. 	Comparar níveis simulados com os monitorados no Ponto C, no Evento B.

Fonte: O Autor (2024).

- *Simulação:* Após a calibração e validação (Cenário C: Condição Atual), foram simulados os perfis hidráulicos dos cenários climáticos propostos no item 4.2 (cenários futuros F1, F2 e F3).

Para isso, o hietograma do cenário C, de calibração (Evento A), foi acrescido com os percentuais representativos de mudança no clima [F1 (2011-2040): 0,89%; F2 (2041-2070): 10,25%; F3 (2071-2100): 13,26%], bem como as alturas de marés corrigidas para as condições de elevação do NMM (F1: +0,0 m; F2: +0,38 m; F3: +0,82 m). As simulações objetivaram avaliar, a partir do Evento A em específico, a vulnerabilidade da infraestrutura de drenagem da bacia do canal Derby-Tacaruna, para os cenários preestabelecidos.

b) Manchas de inundação (2D) no ArcGis:

O módulo hidráulico do SWMM (na versão 5.2 utilizada nesta pesquisa) representa, apenas, o escoamento unidimensional. Nos casos de transbordamento da macrodrenagem, para os cenários simulados, as manchas de inundação na área urbanizada foram representadas no *software* ArcGis. Este procedimento foi realizado pela ferramenta “*Reclassify*” (*ArcToolbox* → *3D Analyst Tools* → *Raster Reclass*), onde foi efetuada a sobreposição do nível da água no MDT (Modelo Digital do Terreno) da bacia do canal Derby-Tacaruna, chegando-se à provável cota máxima simulada de inundação, obtida no SWMM, para os cenários mais críticos. Tal representação foi feita, apenas, para caracterizar a vulnerabilidade da área à inundação.

4.4. ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DE MEDIDAS ADAPTATIVAS PARA A INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM

Nesta etapa, foram propostas medidas para a readequação e/ou adaptação da infraestrutura de drenagem urbana do local estudado frente às mudanças do clima, baseadas nas respostas dos modelos hidrológico-hidráulico (SWMM), a partir dos cenários estabelecidos no prognóstico.

Considerando as condições da área estudada (planície densamente urbanizada e vulnerável as oscilações de maré), e a complexidade de análise dos problemas de drenagem urbana, para os quais não existe uma solução padrão a ser recomendada, torna-se necessária a análise caso a caso para a proposição de medidas estruturais recomendáveis para o sistema local. É verdade que recomendações genéricas podem (e devem) ser seguidas, mas as soluções de projeto mudam de bacia para bacia, pela combinação dos efeitos do escoamento no espaço e no tempo. Pode-se, por exemplo, trabalhar com medidas de armazenagem e infiltração, em um contexto de resgate do comportamento hidrológico original, e de canalização, conforme

abordagem tradicional de projeto. Em contrapartida, no caso dos reservatórios, por exemplo, a definição do volume, dos dispositivos de descarga e da localização dessas unidades de armazenagem, no contexto de um projeto de controle de inundações/alagamentos, depende de cada área analisada.

Em suma, após a modelagem da macrodrenagem da bacia do canal Derby-Tacaruna frente aos cenários climáticos, avaliou-se, através do SWMM, o desempenho de medidas, de cunho adaptativas, na redução da vulnerabilidade futura simulada (2040, 2070 e 2100), abrangendo desde a readequação do sistema até a construção de novas estruturas. Para isso, considerou-se o seguinte:

- **Estratégia 1** - Readequação da infraestrutura de drenagem existente, baseada no:
 - Reestabelecimento do funcionamento da comporta do Eixo Sul;
 - Técnicas de drenagem localizadas baseada em controle LID – com aumento da infraestrutura verde na bacia do Derby-Tacaruna. A análise de controle LID nos lotes foi feita em escala de sub-bacias do canal Derby-Tacaruna, a partir dos dados disponibilizados pelo ESIG-Recife (ESIG, 2014), avaliando as possibilidades de adequação dos lotes ao LUOS (Lei de Uso e Ocupação do Solo) do Recife (Recife, 1996), o qual estabelece no artigo 65 que, em área de ZUP 1 (Zona de Urbanização Preferencial), na qual está inserida a bacia do canal Derby-Tacaruna, seja preservada um percentual mínimo para a Taxa de Solo Natural (TSN) de 25% da área do lote, a ser mantida em suas condições naturais ou tratada com vegetação.
- **Estratégia 2** - Inserção de novas estruturas de drenagem, através de:
 - Aumento da capacidade de bombeamento da estação do Eixo Norte, atualmente em operação, considerando o pleno funcionamento das 3 bombas de 1 m³/s já instaladas. Por motivos de *layout* de poço de sucção, apenas 2 das 3 bombas estão em funcionamento.
 - Construção de nova estação de bombeamento no Eixo Sul do canal, com configuração similar à estação do Eixo Norte, baseada em projeto existente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES HIDROCLIMÁTICAS

Neste item, mostra-se os resultados da análise estatística nas séries temporais de temperatura e precipitação com objetivo de detectar tendências climáticas para o Recife. Como já informado, estes resultados, que compuseram a qualificação desta Tese, foram publicados na “*Revista de Geografia (Recife)*”, como parte dos requisitos do doutorado.

5.1.1. Análise exploratória dos dados de temperatura e precipitação

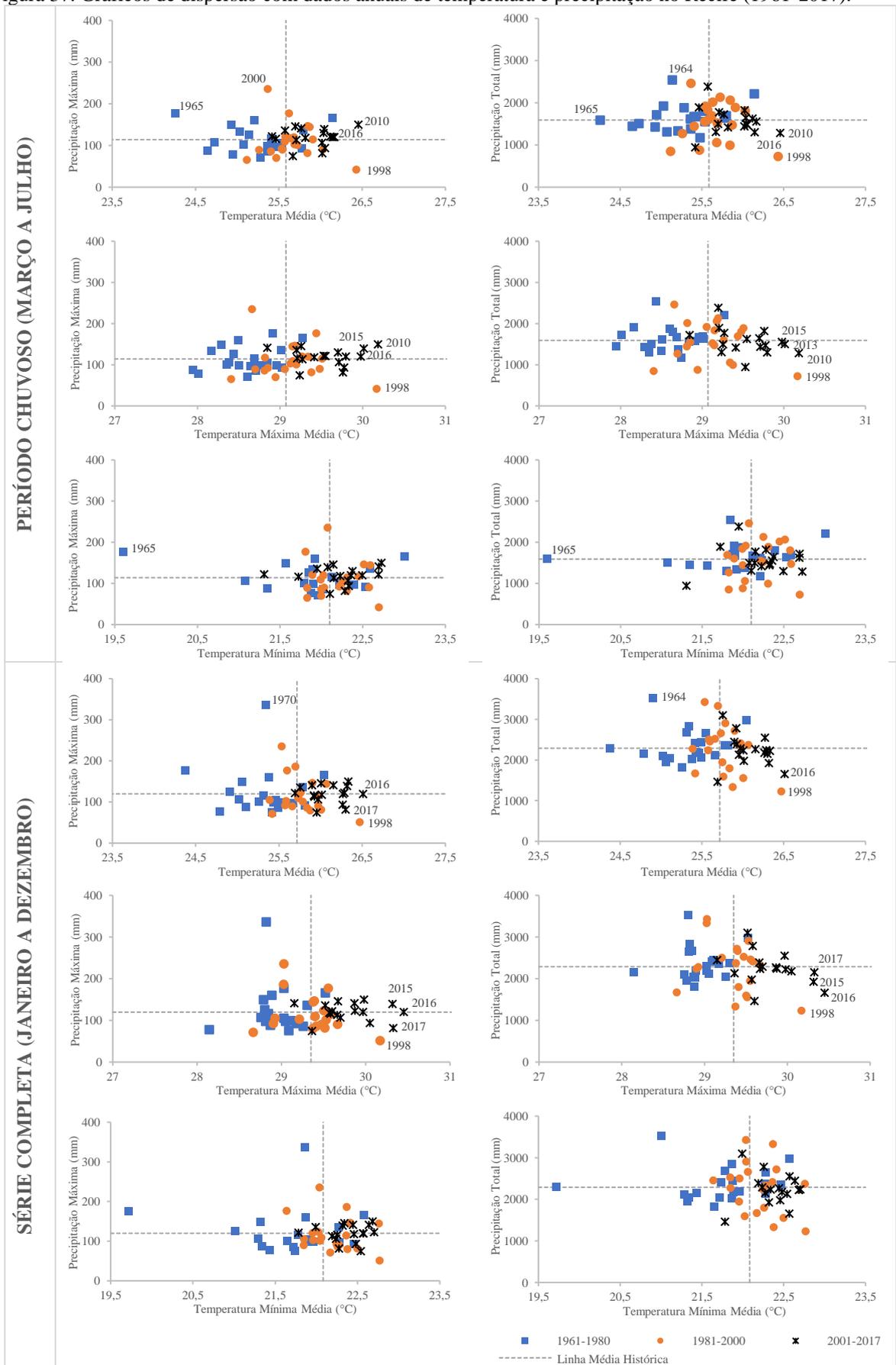
As séries temporais de temperaturas mínima, média e máxima (mensal e anual) apresentaram dados homogêneos, com baixa dispersão e pouca variabilidade ($CV \leq 5\%$). Os valores médios de temperatura mínima, média e máxima (mensal e anual) da série parcial 3 (2001-2017) encontram-se acima da média histórica (1961-2017), revelando aumento da variável ao longo do tempo (Tabela 19). Outro indicativo é apresentado nos valores médios anuais das temperaturas analisadas, com médias ascendentes ao longo das três séries parciais consideradas (Tabela 19).

Já as séries temporais de precipitação total e máxima (mensal) apresentaram dados heterogêneos, com alta dispersão e grande variabilidade ($CV \geq 30\%$). Observa-se que os valores médios das séries parciais 2 e 3 (1981-2000 e 2001-2017, respectivamente) para os totais precipitados anuais e apenas para o período chuvoso, encontram-se abaixo da média histórica (Tabela 20). Em contrapartida, os valores médios da série parcial 3 (2001-2017), para as precipitações máximas anuais e durante o período chuvoso, são maiores que o valor médio da série completa, indicando o aumento dos índices pluviométricos diários (Tabela 20).

Numa análise decadal dos totais precipitados registrados no Recife entre 1961 e 2017, verificou-se que o período de 1964 a 1973 foi o mais chuvoso, com valor médio de 2513,24 mm, enquanto que entre 1990 e 1999 foi menos chuvoso, com 2011,93 mm. Ainda foi possível observar que grande parte dos valores médios nas séries decadais de totais precipitados ficaram abaixo da média histórica (2290,55 mm) a partir dos anos 90.

Numa análise gráfica de dados em dispersão (Figura 37), confrontando as variáveis “precipitação” e “temperatura”, e contemplando os períodos chuvoso (março a julho) e completo (janeiro a dezembro), fica notório o comportamento das citadas variáveis para os intervalos anuais das séries parciais trabalhadas: 1961-1980; 1981-2000; e 2001-2017.

Figura 37. Gráficos de dispersão com dados anuais de temperatura e precipitação no Recife (1961-2017).



Fonte: Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020).

Quando analisado o período chuvoso (março a julho) na Figura 37, evidenciou-se o aumento dos registros médios de temperatura média e máxima nos últimos anos, com valores de temperatura do ar acima da média histórica (1961-2017) em boa parte da série parcial 3 (2001-2017). Já os registros médios de temperatura mínima têm ficado mais concentrados entre 21 e 23 °C, com pouca variabilidade e baixa dispersão em relação à média histórica. Para as precipitações máximas e totais registradas, não é possível evidenciar tendência de aumento ou redução nos seus índices. Entretanto, observou-se que nos últimos anos (2001-2017), os registros de precipitação máxima se mantiveram mais próximos da média histórica, apresentando moderada dispersão ($CV = 19\%$).

Ainda sobre a Figura 37 e analisando a série completa (janeiro a dezembro), observou-se que o aumento nos valores médios de temperaturas média, máxima e mínima, nos últimos anos, ficam ainda mais evidentes, com valores de temperatura do ar acima da média histórica (1961-2017) em quase todos os anos da série parcial 3 (2001-2017). Quanto às precipitações máximas e totais, o comportamento de seus índices é similar à análise do período chuvoso, sem evidente tendência e com grande parte dos registros de precipitação máxima bem próximos à média histórica na série parcial 3 (2001-2017), com moderada dispersão ($CV = 18\%$). Nesse caso específico, observou-se redução na dispersão e variabilidade dos registros de precipitação máxima ao longo das três séries parciais (1961-1980 $\rightarrow CV = 48,4\%$; 1981-2000 $\rightarrow CV = 37\%$; 2001-2017 $\rightarrow CV = 18\%$).

5.1.2. Análise de tendências nas séries temporais de temperatura e precipitação

a) Temperatura:

Em parte das séries temporais de temperaturas mínima, média e máxima (mensal e anual), a regressão linear simples apontou tendência positiva nos dados, com coeficientes angulares maiores que zero ($a > 0$) e com poucos resultados de coeficientes de determinação variando de moderado a forte. Em contrapartida, a maioria dos modelos lineares não apresentaram tendências significativas estatisticamente, com baixos valores de coeficientes de determinação ($R^2 < 0,30$), principalmente nas séries temporais de temperatura mínima (Tabela 19).

Tabela 19. Análise estatística nas séries temporais de temperaturas mínima, média e máxima (1961-2017).

PARAM. ESTATÍSTICOS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL	
TEMP. MÍNIMA	1 – Análise Exploratória dos Dados													
	CV (%)	4	3	3	3	2	2	3	3	3	4	4	4	2
	Média (1961-2017)	22,72	22,96	22,94	22,70	22,20	21,62	21,03	20,70	21,30	21,96	22,31	22,62	22,10
	Média (1961-1980)	22,25 ↓	22,52 ↓	22,60 ↓	22,47 ↓	22,03 ↓	21,55 ↓	20,87 ↓	20,34 ↓	20,98 ↓	21,43 ↓	21,62 ↓	22,07 ↓	21,74 ↓
	Média (1981-2000)	22,88 ↑	23,10 ↑	23,06 ↑	22,86 ↑	22,25 ↑	21,63 ↑	21,11 ↑	20,93 ↑	21,35 ↑	22,07 ↑	22,47 ↑	22,65 ↑	22,20 ↑
	Média (2001-2017)	23,06 ↑	23,27 ↑	23,21 ↑	22,78 ↑	22,34 ↑	21,69 ↑	21,13 ↑	20,84 ↑	21,64 ↑	22,46 ↑	22,92 ↑	23,21 ↑	22,38 ↑
	2 – Teste Paramétrico: Regressão Linear Simples													
	a (coef. angular)	0,025	0,022	0,018	0,011	0,010	0,005	0,009	0,014	0,020	0,029	0,035	0,029	0,019
	R ²	0,261	0,211	0,217	0,095	0,087	0,023	0,064	0,114	0,249	0,385	0,456	0,286	0,363
	3 – Testes Não-Paramétricos: Mann-Kendall e Curvatura de Sem													
	<i>Kendall's tau</i>	0,318	0,295	0,322	0,222	0,203	0,062	0,135	0,222	0,328	0,418	0,499	0,384	0,438
	<i>p-value</i>	0,000	0,001	0,000	0,007	0,013	0,248	0,069	0,007	0,000	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<i>Sen's slope</i>	0,020	0,016	0,015	0,010	0,007	0,003	0,006	0,012	0,015	0,024	0,031	0,025	0,016
	Tendência*	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(null)	(null)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
TEMP. MÉDIA	1 – Análise Exploratória dos Dados													
	CV (%)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Média (1961-2017)	26,60	26,78	26,70	26,34	25,69	24,90	24,30	24,20	24,81	25,64	26,21	26,53	25,74
	Média (1961-1980)	26,23 ↓	26,36 ↓	26,19 ↓	25,99 ↓	25,35 ↓	24,66 ↓	24,07 ↓	23,89 ↓	24,47 ↓	25,23 ↓	25,72 ↓	26,07 ↓	25,37 ↓
	Média (1981-2000)	26,71 ↑	26,80 ↑	26,83 ↑	26,41 ↑	25,76 ↑	24,95 ↑	24,33 ↑	24,32 ↑	24,86 ↑	25,70 ↑	26,19 ↓	26,50 ↓	25,78 ↑
	Média (2001-2017)	26,89 ↑	27,18 ↑	27,13 ↑	26,67 ↑	26,02 ↑	25,10 ↑	24,53 ↑	24,43 ↑	25,16 ↑	26,07 ↑	26,79 ↑	27,10 ↑	26,09 ↑
	2 – Teste Paramétrico: Regressão Linear Simples													
	a (coef. angular)	0,020	0,022	0,026	0,020	0,018	0,012	0,013	0,015	0,020	0,023	0,028	0,026	0,020
	R ²	0,335	0,340	0,472	0,408	0,460	0,260	0,305	0,286	0,469	0,500	0,591	0,502	0,621
	3 – Testes Não-Paramétricos: Mann-Kendall e Curvatura de Sem													
	<i>Kendall's tau</i>	0,384	0,413	0,509	0,439	0,490	0,344	0,377	0,391	0,514	0,520	0,596	0,519	0,619
	<i>p-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<i>Sen's slope</i>	0,018	0,021	0,025	0,021	0,018	0,011	0,012	0,015	0,018	0,020	0,027	0,026	0,020
	Tendência*	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
TEMP. MÁXIMA	1 – Análise Exploratória dos Dados													
	CV (%)	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	Média (1961-2017)	30,48	30,59	30,45	29,98	29,19	28,17	27,57	27,70	28,32	29,33	30,11	30,44	29,38
	Média (1961-1980)	30,21 ↓	30,21 ↓	29,78 ↓	29,52 ↓	28,67 ↓	27,77 ↓	27,26 ↓	27,43 ↓	27,96 ↓	29,02 ↓	29,83 ↓	30,07 ↓	29,00 ↓
	Média (1981-2000)	30,53 ↑	30,50 ↓	30,6 ↑	29,95 ↓	29,27 ↑	28,28 ↑	27,56 ↓	27,71 ↑	28,38 ↑	29,33 ↓	29,91 ↓	30,35 ↓	29,36 ↓
	Média (2001-2017)	30,73 ↑	31,10 ↑	31,05 ↑	30,56 ↑	29,70 ↑	28,52 ↑	27,94 ↑	28,02 ↑	28,68 ↑	29,68 ↑	30,66 ↑	30,99 ↑	29,80 ↑
	2 – Teste Paramétrico: Regressão Linear Simples													
	a (coef. angular)	0,014	0,023	0,033	0,029	0,026	0,020	0,018	0,016	0,019	0,017	0,021	0,023	0,021
	R ²	0,160	0,238	0,409	0,467	0,554	0,494	0,359	0,309	0,384	0,264	0,317	0,372	0,609
	3 – Testes Não-Paramétricos: Mann-Kendall e Curvatura de Sem													
	<i>Kendall's tau</i>	0,274	0,308	0,447	0,534	0,550	0,515	0,438	0,396	0,426	0,324	0,412	0,448	0,588
	<i>p-value</i>	0,001	0,000	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,000	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<i>Sen's slope</i>	0,015	0,022	0,033	0,030	0,027	0,021	0,020	0,016	0,018	0,015	0,020	0,022	0,021
	Tendência*	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

Nota: ↑ Acima da média histórica (1961-2017); ↓ Abaixo da média histórica (1961-2017); *Tendência com 5% de nível de significância; (+) Tendência positiva; (-) Tendência negativa; (null) Hipótese nula, sem tendência.

Fonte: Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020).

Com a aplicação dos testes de Mann-Kendall e de Curvatura de Sen, adotando 5% de nível de significância, observou-se que os dados analisados apresentaram tendências positivas significantes, com exceção dos meses de junho e julho da série temporal de temperatura mínima, em que foram aceitas a hipótese nula (Tabela 19). Considerando 10% de nível de significância, os sobreditos meses revelam tendência positiva levemente significativa, rejeitando assim, a hipótese nula anterior.

Ao longo do período analisado (1961-2017), estima-se que as temperaturas mínima, média e máxima cresceram, aproximadamente, 0,91 °C, 1,14 °C e 1,20 °C, respectivamente. Isso quer dizer que há um aumento anual de 0,016 °C nas temperaturas mínimas, 0,020 °C nas temperaturas médias e 0,021 °C nas temperaturas máximas, corroborando com Souza e Azevedo (2009; 2012) que apontou aumentos anuais de 0,020 °C nas temperaturas mínimas e 0,022 °C nas temperaturas máximas, entre os anos de 1961 e 2008. Os cenários projetados pelo modelo BESM para o período de 2010 a 2100 nas proximidades do Posto Curado apontam tendência similar aos obtidos nesta análise, com aumento médio anual de 0,012 °C para o cenário RCP 4,5 e 0,029 °C para o RCP 8,5 nas temperaturas médias (Nobre *et al.*, 2013).

Segundo PBMC (2016), as projeções de temperatura do ar no Recife para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, geradas pelos registros de 1961 a 1990 a partir de modelos climáticos globais, indicaram aumento na frequência de temperaturas extremas durante o dia e à noite. Para Waycarbon (2019), a partir dos modelos regionalizados (Eta-hadGEM2-ES e Eta-MIROC5), no período de 2011-2040 haverá aumento nas temperaturas médias, máximas e mínimas do Recife, com variações entre 3 e 5% para os cenários intermediário e pessimista (RCP 4,5 e RCP 8,5).

b) Precipitação:

Nas séries de precipitações máximas e totais (mensal e anual), a regressão linear simples não apontou tendência estatisticamente significativa nos dados históricos, diante dos baixos coeficientes de determinação ($R^2 < 0,30$) e dos altos coeficientes de variação (Tabela 20).

Em contrapartida, os testes de Mann-Kendall e Curvatura de Sen mostraram que, apenas para os meses de março e setembro da série temporal de totais precipitados, foi detectada tendência negativa e estatisticamente significativa, rejeitando a hipótese nula. Para as outras unidades de tempo da sobredita série, bem como para as séries temporais de precipitação máxima, foram aceitas a hipótese nula, sem detecção de tendência estatisticamente significativa

(Tabela 20). Nesse interim, Pessoa *et al.* (2023) demonstraram, também, não haver tendências anuais ou mensais nos registros de precipitação do Recife. Para os autores, apenas quando a análise é sazonal que se revelam tendências positiva no outono e negativa para as demais estações.

Tabela 20. Análise estatística nas séries temporais de precipitação total e máxima (1961-2017).

PARAM. ESTATÍSTICOS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	P CH*	ANUAL
PREC. TOTAL														
1 – Análise Exploratória dos Dados														
CV (%)	68	74	56	57	41	36	39	51	67	76	67	72	23	21
Média (1961-2017)	103,91	134,26	234,31	292,12	319,84	387,97	356,61	199,27	109,23	57,92	38,39	58,62	1590,84	2290,55
Média (1961-1980)	98,68 ↓	148,0 ↑	282,6 ↑	303,9 ↑	312,1 ↓	393,4 ↑	358,5 ↑	189,3 ↓	129,6 ↑	59,42 ↑	37,4 ↓	58,81 ↑	1650 ↑	2370 ↑
Média (1981-2000)	105,8 ↑	123,0 ↓	210,3 ↓	298,8 ↑	322,2 ↑	345,3 ↓	378,8 ↑	219,5 ↑	109,2 ↓	60,77 ↑	38,6 ↑	49,53 ↓	1555 ↓	2262 ↓
Média (2001-2017)	107,6 ↑	132,2 ↓	205,8 ↓	270,4 ↓	326,1 ↑	431,8 ↑	328,3 ↓	187,3 ↓	85,28 ↓	52,82 ↓	39,31 ↑	69,09 ↑	1562 ↓	2236 ↓
2 – Teste Paramétrico: Regressão Linear Simples														
a (coef. angular)	0,025	-0,727	-2,265	-1,016	0,463	0,304	-0,681	-0,264	-0,873	-0,029	0,113	0,244	-3,194	-4,717
R ²	0,000	0,014	0,080	0,010	0,003	0,001	0,006	0,002	0,038	0,000	0,005	0,009	0,020	0,026
3 – Testes Não-Paramétricos: Mann-Kendall e Curvatura de Sen														
Kendall's tau	0,016	-0,105	-0,195	-0,070	0,010	0,050	-0,033	-0,010	-0,157	-0,021	0,084	0,050	-0,105	-0,096
p-value	0,433	0,126	0,016	0,222	0,456	0,293	0,358	0,456	0,043	0,410	0,178	0,293	0,124	0,148
Sen's slope	0,096	-0,820	-1,861	-1,084	0,092	0,653	-0,398	0,099	-0,833	0,057	0,153	0,136	-3,081	-4,001
Tendência**	(null)	(null)	(-)	(null)	(null)	(null)	(null)	(null)	(-)	(null)	(null)	(null)	(null)	(null)
PREC. MÁXIMA														
1 – Análise Exploratória dos Dados														
CV (%)	78	72	55	54	49	43	46	93	76	91	70	100	28	37
Média (1961-2017)	33,78	43,06	63,24	65,37	70,84	84,75	70,58	51,21	30,24	20,57	13,86	25,48	113,92	119,75
Média (1961-1980)	32,82 ↓	44,04 ↑	68,40 ↑	58,44 ↓	66,07 ↓	89,56 ↑	75,15 ↑	58,31 ↑	33,34 ↑	21,37 ↑	14,40 ↑	21,64 ↓	113,9 ↑	124,22 ↑
Média (1981-2000)	38,54 ↑	39,86 ↓	61,03 ↓	70,40 ↑	73,59 ↑	73,26 ↓	66,84 ↓	55,37 ↑	30,67 ↑	20,37 ↓	12,47 ↓	21,04 ↓	109,4 ↓	115,06 ↓
Média (2001-2017)	29,26 ↓	45,75 ↑	59,77 ↓	67,60 ↑	73,21 ↑	92,61 ↑	69,59 ↓	37,98 ↓	26,10 ↓	19,88 ↓	14,86 ↑	35,22 ↑	119,3 ↑	120,01 ↑
2 – Teste Paramétrico: Regressão Linear Simples														
a (coef. angular)	-0,147	0,047	-0,215	0,266	0,195	-0,010	-0,166	-0,453	-0,174	-0,006	0,053	0,307	0,069	-0,125
R ²	0,008	0,001	0,010	0,016	0,009	0,000	0,007	0,025	0,016	0,000	0,008	0,039	0,001	0,002
3 – Testes Não-Paramétricos: Mann-Kendall e Curvatura de Sen														
Kendall's tau	-0,014	-0,040	-0,066	0,102	0,041	0,031	-0,078	-0,103	-0,099	0,051	0,114	-0,001	0,073	0,055
p-value	0,441	0,331	0,233	0,132	0,330	0,368	0,197	0,129	0,138	0,289	0,108	0,495	0,214	0,277
Sen's slope	-0,028	-0,093	-0,208	0,299	0,099	0,079	-0,222	-0,201	-0,127	0,049	0,067	0,000	0,216	0,200
Tendência**	(null)													

Nota: ↑ Acima da média histórica (1961-2017); ↓ Abaixo da média histórica (1961-2017); *Período chuvoso (março, abril, maio, junho e julho); **Tendência com 5% de nível de significância; (+) Tendência positiva; (-) Tendência negativa; (null) Hipótese nula, sem tendência.

Fonte: Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020).

Para os meses de março e setembro, foram estimadas reduções de 106,08 mm (-1,86 mm/mês por ano - Tabela 20, *Sen's Slope*) e 47,48 mm (-0,84 mm/mês por ano - Tabela 20, *Sen's Slope*), respectivamente, nos totais precipitados ao longo de todo o período analisado (1961-2017), ou seja, 57 anos. Os cenários projetados pelo modelo BESM para o período de 2010 a 2100 nas proximidades do Posto Curado apontam tendência similar aos obtidos nesta

análise, com redução média anual de $-1,18$ mm/mês para o cenário RCP 4,5 e $-1,81$ mm/mês para o RCP 8,5 nas precipitações médias mensais (Nobre *et al.*, 2013). Corroborando também com os resultados, as projeções dos indicadores de extremos de chuva para os anos de 2011 a 2100, definidas pelo PBMC (2016), indicaram redução nos totais acumulados anuais de precipitação, com índices bem abaixo da média registrada entre 1961 e 1990.

5.1.3. Análise de tendências na ocorrência de precipitações extremas

Boa parte da literatura, que tem como enfoque as precipitações extremas no meio urbano, consideram que chuvas a partir de 30 mm em 24 h já podem causar impactos na rotina de uma cidade (PBMC, 2016; Fonseca, 2017; Wanderley *et al.*, 2018; Nunes; Pinto; Baptista, 2018). Os valores extremos de chuva em 24 h medidos em estações do INMET, como a Estação Curado (Recife), registram os maiores acumulados de chuva entre 9 h do dia anterior e 9 h do dia em questão.

Ao analisar a frequência desses eventos em Recife, foram encontrados um total de 1141 registros entre 1961 e 2017, caracterizando uma média de 20 ocorrências por ano. Apesar desse número, tem-se observado uma redução na ocorrência de tais eventos ao longo do tempo. Estatisticamente, o teste de Mann-Kendall comprova essa tendência negativa e levemente significativa (Tabela 21).

Ao discretizar os registros pluviométricos em faixas de precipitação, observa-se na Tabela 21, a partir da regressão linear simples, que os coeficientes angulares são negativos ($a < 0$) em todos os intervalos de altura de chuva, com exceção da faixa ≥ 100 mm. Apesar do modelo linear indicar tendência, estatisticamente, ela não é significativa diante dos baixos coeficientes de determinação (R^2).

Com a aplicação do teste de Mann-Kendall, com níveis de significância de 5% e 10%, observou-se que há tendência negativa para as faixas de precipitação 40-49,9 mm e 60-69,9 mm. Para precipitações acima de 100 mm em 24 h, o teste revelou tendência positiva e levemente significativa, corroborando com os resultados de Wanderley *et al.* (2018), Silva, Montenegro e Souza (2017), PBMC (2016) e Souza e Azevedo (2012) que indicaram haver aumento na ocorrência de chuvas extremamente fortes concentradas em um dia (≥ 100 mm). Para as outras faixas de precipitação foram aceitas a hipótese nula, sem identificação de tendência significativa ou levemente significativa.

Analisando apenas as precipitações extremas com índices acima de 100 mm, observou-se que 81% dos eventos registrados ocorreram durante o período chuvoso, entre os meses de março e julho. Wanderley *et al.* (2018) também identificaram que os eventos de chuvas fortes a extremamente fortes no Recife (≥ 25 mm) se concentram, em sua maioria, nos meses de março e julho. Apesar disso, o maior índice pluviométrico foi registrado em agosto de 1970, com 335,8 mm em 24 h. A média histórica das precipitações extremas (≥ 100 mm) é 126,67 mm, enquanto que as médias das séries parciais 1, 2 e 3 são 133,92 mm, 129,07 mm e 120,03 mm, respectivamente.

Tabela 21. Frequência e tendência da ocorrência de dias com precipitações acima de 30 mm.

Faixa de Precipitação	Total de dias				Regressão Linear		Teste de Mann-Kendall		
	1961-1980	1981-2000	2001-2017	1961-2017	A	R ²	p-value	5%*	10%**
30 – 39,9 mm	149	134	120	403	-0,016	0,011	0,147	(null)	(null)
40 – 49,9 mm	93	82	63	238	-0,020	0,026	0,068	(null)	(-)
50 – 59,9 mm	62	53	38	153	-0,017	0,021	0,126	(null)	(null)
60 – 69,9 mm	45	40	31	116	-0,019	0,053	0,035	(-)	(-)
70 – 79,9 mm	25	33	22	80	-0,004	0,002	0,381	(null)	(null)
80 – 89,9 mm	17	14	14	45	-0,001	0,000	0,300	(null)	(null)
90 – 99,9 mm	13	7	10	30	-0,003	0,005	0,302	(null)	(null)
≥ 100 mm	23	26	26	75	0,011	0,019	0,077	(null)	(+)
≥ 30 mm	427	389	324	1140	-0,068	0,036	0,083	(null)	(-)

Nota: *Tendência significante; **Tendência levemente significante; (+) Tendência positiva; (-) Tendência negativa; (null) Hipótese nula, sem tendência.

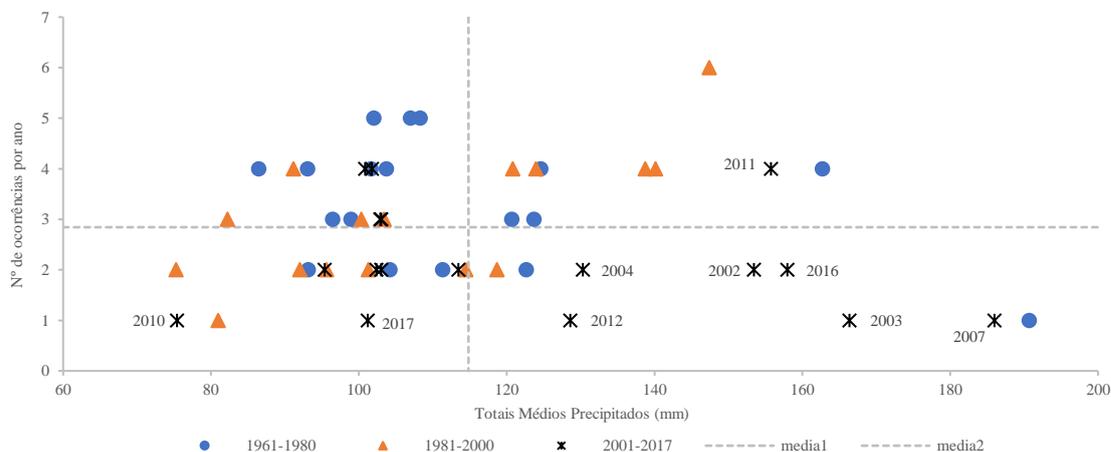
Fonte: Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020).

Numa análise dos eventos de chuva acima de 30 mm em dias consecutivos, verificou-se uma redução da ocorrência desses eventos ao longo do período analisado (1961-1980 \rightarrow 81 eventos; 1981-2000 \rightarrow 59 eventos; 2001-2017 \rightarrow 42 eventos). A maior parte desses eventos ocorreram em 2 dias (1961-1980 \rightarrow 60 eventos; 1981-2000 \rightarrow 48 eventos; 2001-2017 \rightarrow 37 eventos), porém há registro de evento com 7 dias consecutivos de chuva acima 30 mm, ocorrido em 20 a 26 de abril de 1970 com total de 317,80 mm.

A Figura 38 mostra os dados em dispersão a partir do confronto entre as variáveis “número de ocorrências de eventos de 2 dias por ano” versus “totais médios precipitados entre tais eventos”. Nela é possível observar que, nos últimos anos (2001-2017), a quantidade de eventos com 2 dias consecutivos (considerando chuvas acima de 30 mm) têm ficado abaixo da média histórica de ocorrências, que é 2,84 dias. Em contrapartida, grande parte desses eventos apresentaram maiores totais precipitados, com valores bem acima da média histórica (114,83

mm), sugerindo que, nos últimos anos (2001-2017), houve redução na quantidade de eventos com 2 dias consecutivos no ano, mas com maiores índices de chuvas acumuladas.

Figura 38. Gráfico de dispersão para eventos de dois dias consecutivos com chuvas acima de 30 mm.



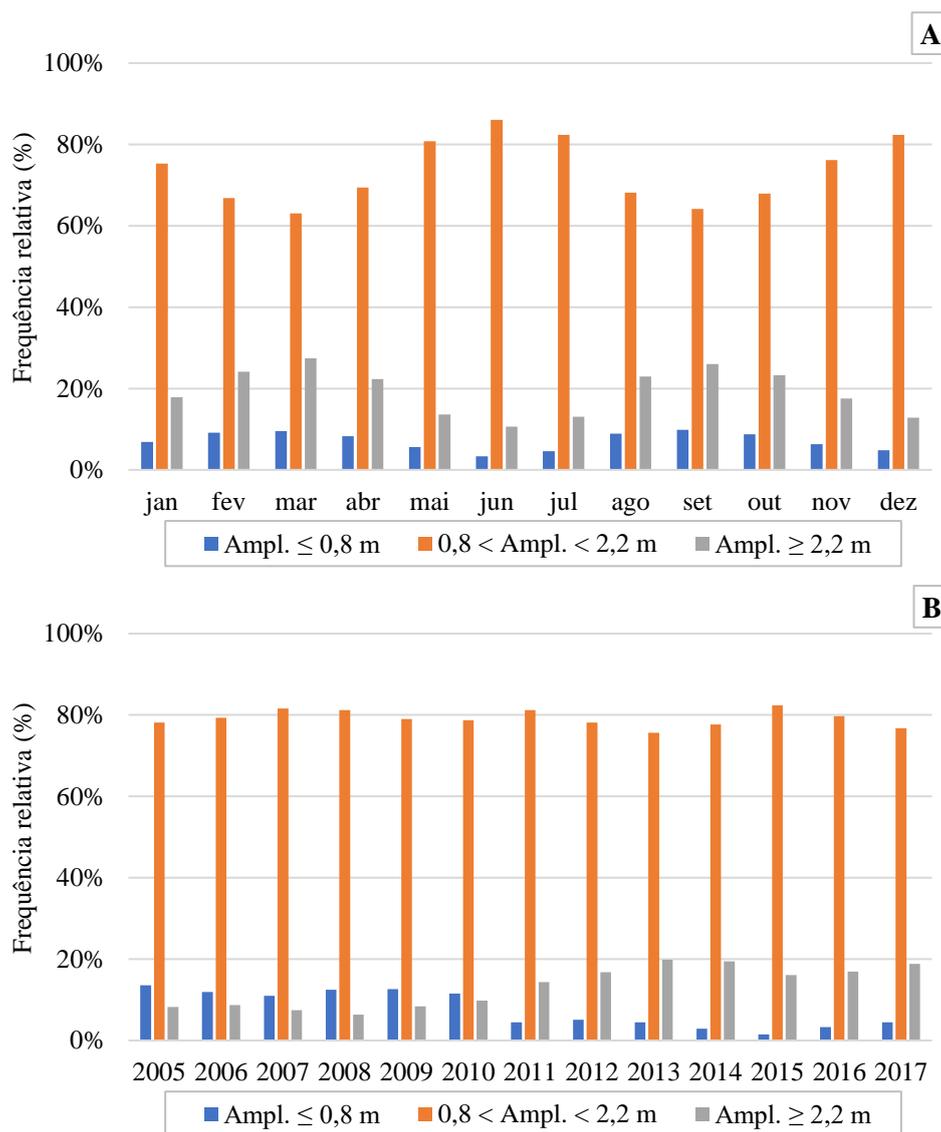
Fonte: Silva Junior, Fonseca Neto e Cabral (2020).

5.1.4. Análise exploratória da série temporal de previsões de marés e de medições no Porto do Recife

A seguir, são apresentados os gráficos com as análises de distribuição de frequências relativas para as previsões astronômicas de marés no Porto do Recife, entre 2005 e 2017. O Porto do Recife que dista, aproximadamente, 1 km da área de estudo. Os dados analisados são referenciados ao zero hidrográfico do DHN (Marinha do Brasil) e registrados na tábua de marés do Porto do Recife.

Na Figura 39, são apresentadas as frequências relativas para três intervalos de amplitudes de marés, considerando a escala temporal mensal e anual. Percebe-se na série analisada, que tanto na escala mensal quanto anual, a frequência relativa das amplitudes de marés (diferença entre maré alta e baixa) variando de 0,80 a 2,20 m representam a maioria e são, em média, 74% (mensal) e 79% (anual) mais frequentes. Para a sobredito intervalo de amplitude de marés (0,80-2,20 m), na escala mensal, observa-se uma variabilidade das frequências relativas ao longo do ano, destacando que as maiores frequências estão concentradas entre maio a julho (meses mais chuvosos). Em contrapartida, amplitudes $\leq 0,8$ m e $\geq 2,2$ m são menos frequentes no período chuvoso. Na escala anual, observa-se que há um aumento na frequência relativa (ampl. $\geq 2,2$ m) e uma redução (ampl. $\leq 0,8$ m) ao longo dos 13 anos analisados.

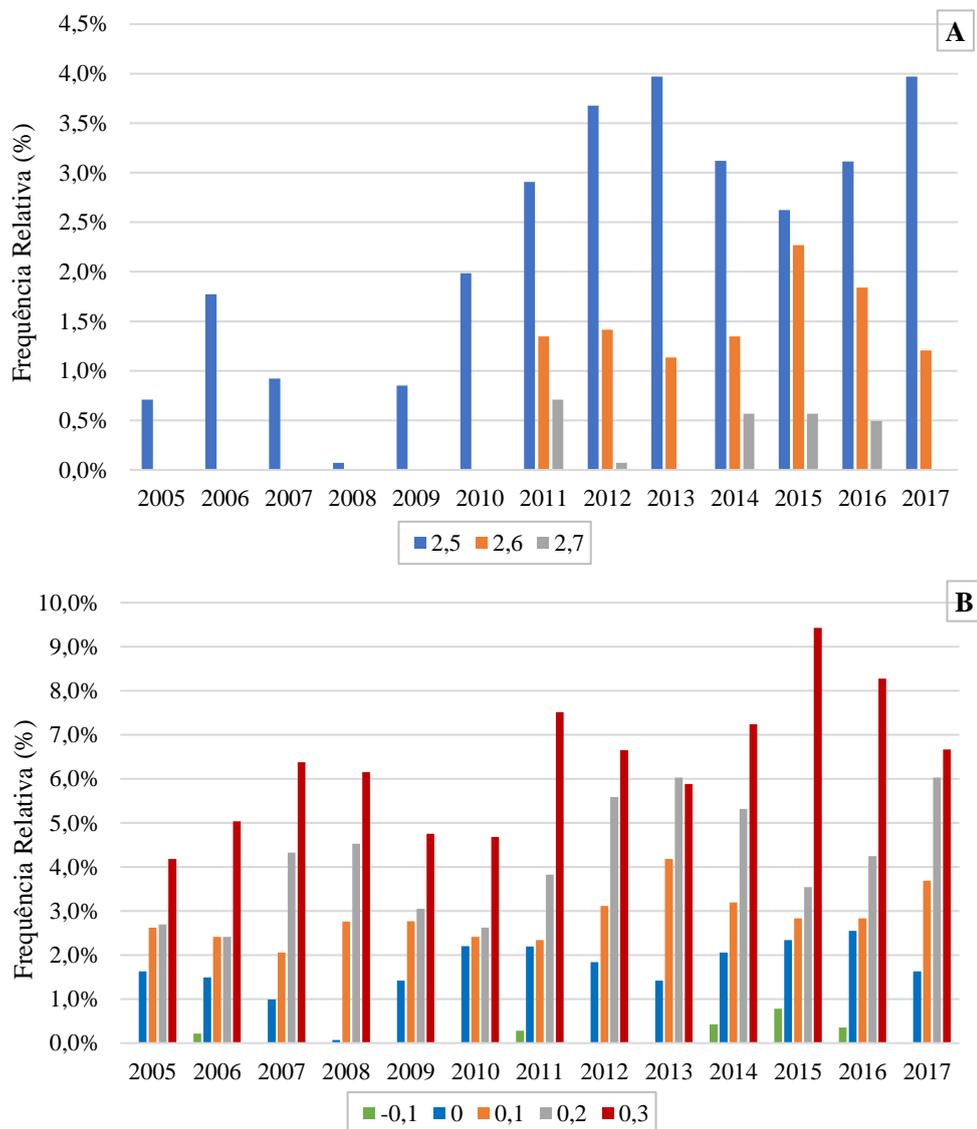
Figura 39. Distribuição de frequência relativa por intervalo de amplitude de maré. a) Mensal b) Anual.



Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 40 são apresentadas as frequências relativas de marés máxima ($\geq 2,5$ m) e mínima ($\leq 0,8$ m), numa escala anual. Analisando as marés máximas, observa-se que até 2010, eram da ordem de 2,5 m. Nos anos seguintes, nota-se a aparição de marés máximas maiores, chegando a 2,7 m. Além da aparição, nota-se também um aumento nas frequências relativas dessas marés, entre 2011 e 2017. Para as marés mínimas, verifica-se que as maiores frequências relativas são referentes a marés de 0,3 m, e que tem aumentado ao longo dos anos analisados.

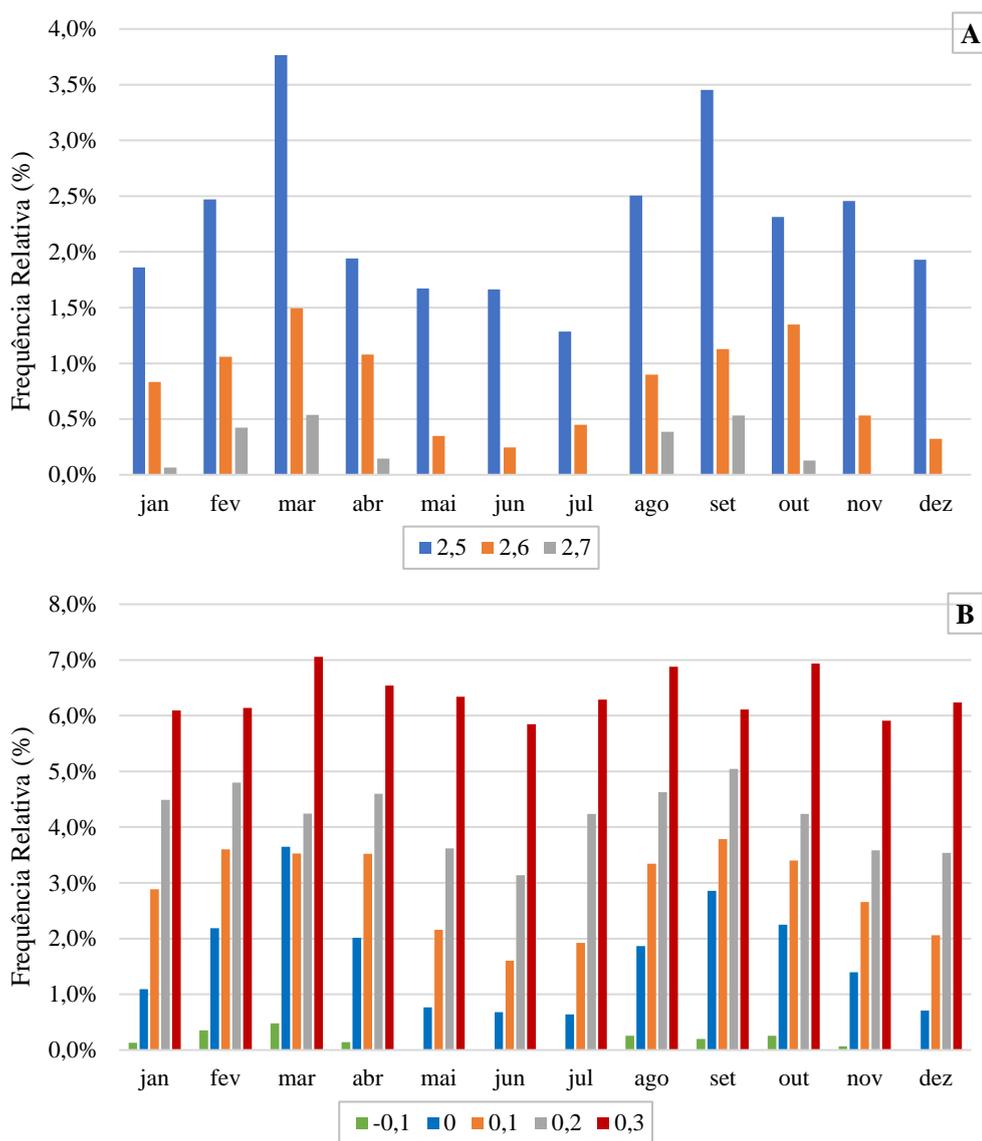
Figura 40. Distribuição anual de frequência relativa das alturas de marés. a) Marés máximas. b) Marés mínimas.



Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 41 são apresentadas as frequências relativas de marés máxima ($\geq 2,5$ m) e mínima ($\leq 0,3$ m), numa escala mensal. Para as marés máximas ($\geq 2,5$ m), nota-se que as maiores frequências relativas estão nos meses de março e setembro. O mês de março já é o início do período chuvoso no Recife, porém nos meses mais chuvosos (maio, junho e julho) são menores as frequências relativas de marés máximas acima de 2,5 m. Para as marés mínimas ($\leq 0,3$ m), nota-se, também, menores frequências relativas entre os meses de março a julho.

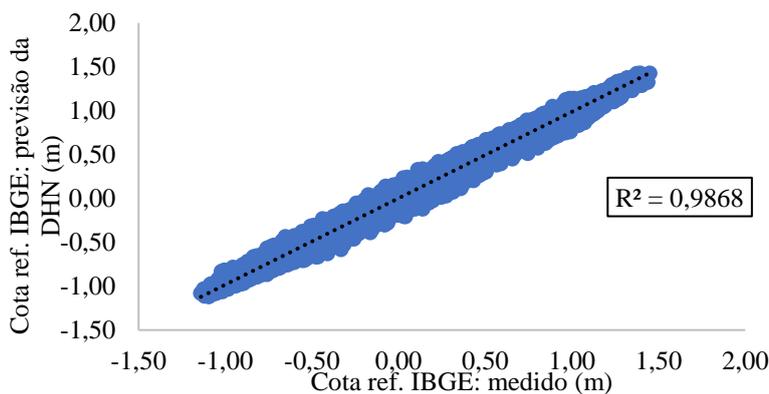
Figura 41. Distribuição mensal de frequência relativa das alturas de marés. a) Marés máximas. b) Marés



Fonte: O Autor (2024).

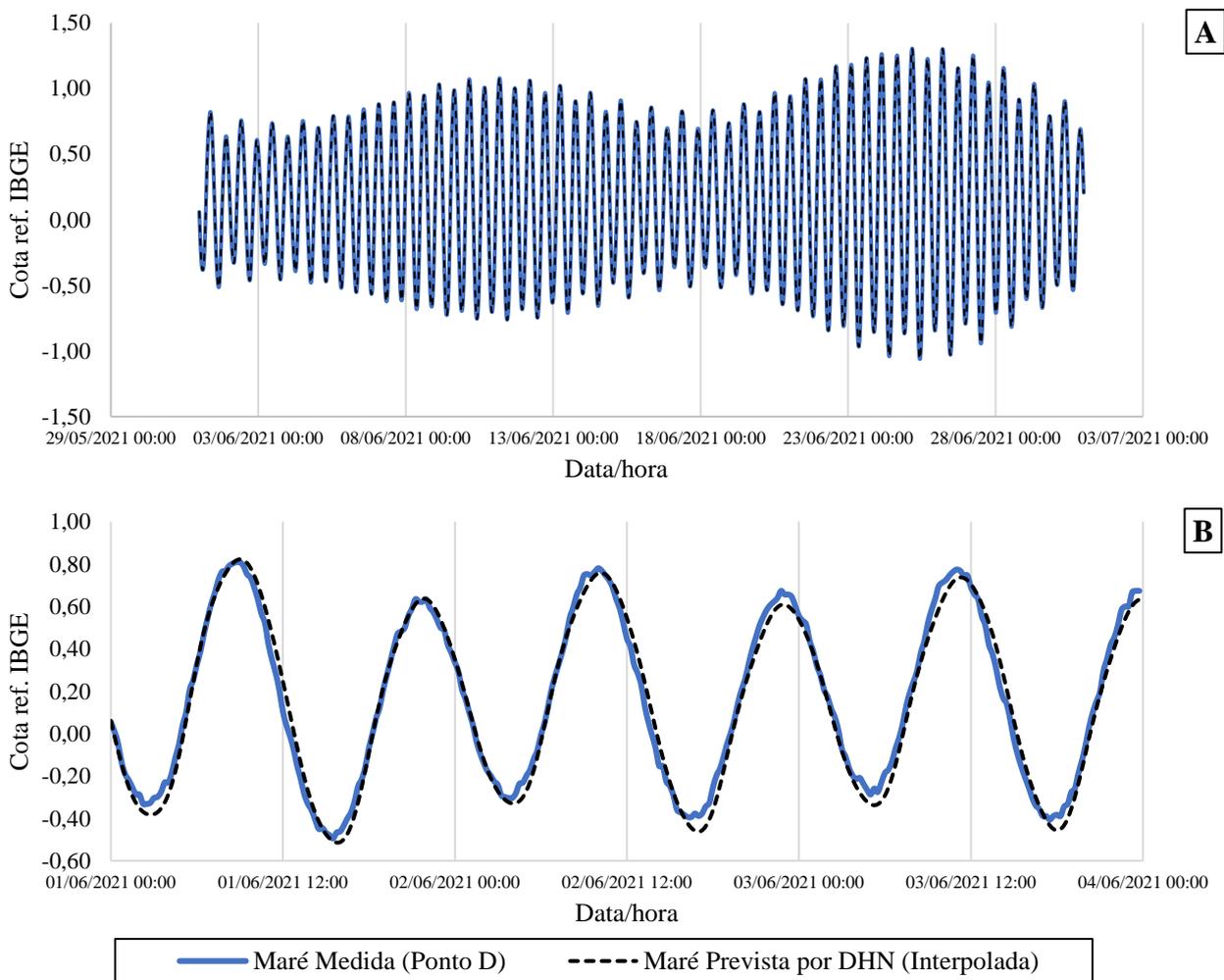
Na sequência, quando comparados os dados de marés previstas, pela DHN, com as marés medidas no Porto do Recife (Ponto D), no âmbito desta pesquisa, observou-se, através de uma análise expedita realizada entre os meses de maio a outubro de 2021, que os parâmetros estatísticos indicam previsões de maré muito boas, apresentando R^2 de 0,9868 (Figura 42), coeficiente de correlação (correl) de 0,9934 e coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) de 0,99. Na Figura 43 é possível observar, graficamente, o comparativo entre o comportamento das marés medidas e interpoladas (com base nas preamares e baixa-mares previstas pela DHN) para o Porto do Recife, considerando o mês de junho de 2021 e, em detalhe, os três primeiros dias do mesmo mês, para marés de quadratura.

Figura 42. Marés previstas pela DNH x marés medidas no Porto do Recife.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 43. Comparativo gráfico entre as marés previstas pela DNH e medidas no Porto do Recife. a) No mês de junho de 2021. b) Nos 3 primeiros dias de junho de 2021.



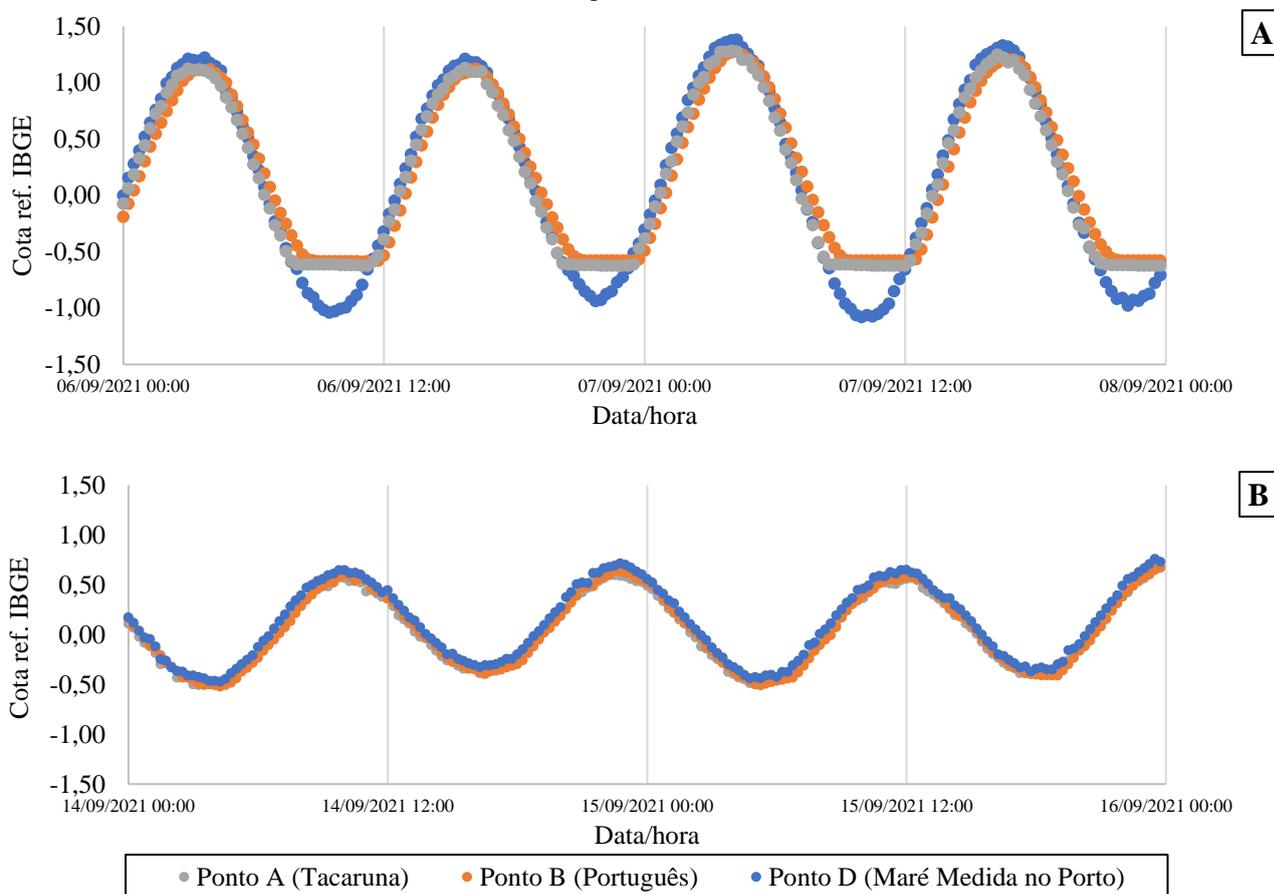
Fonte: O Autor (2024).

Apesar de não ficar tão evidenciado na Figura 43, de maneira preliminar, nesta Tese, foi possível observar uma diferença média em torno de 15-20 cm entre a maré medida e a prevista

pelo DHN (convertida para o IBGE subtraindo 1,14 m) no Porto do Recife, considerando toda a série de dados medidos. É importante mencionar que outros fatores podem ter contribuído para a diferença, como: a precisão do equipamento de monitoramento, o impacto da maresia nos sensores e a instabilidade no nível d'água, pois o local da antiga régua maregráfica fica em área de atracação de navios.

Com relação ao tempo de trânsito do remanso da maré nos exutórios do canal Derby-Tacaruna, por se localizarem no estuário comum dos rios Capibaribe e Beberibe, notou-se equivalência horária entre os picos de maré medidos no Ponto A (Tacaruna) com o Ponto D (Porto), revelando que o tempo de trânsito é nulo. No caso do Ponto B (Português), observou-se um tempo de trânsito médio de 15 minutos, quando comparado com a maré monitorada no Porto (Ponto D), para eventos de maré de sizígia. A Figura 44 ilustra, graficamente, o efeito do remanso da maré nos exutórios Norte e Sul do canal para o mês de setembro de 2021, considerando as marés de sizígia (com amplitude média de 2,20 m) e quadratura (amplitude média de 1,00 m).

Figura 44. Comportamento da maré nos exutórios (Pontos A e B) e no Porto (Ponto D). a) Marés de sizígia. b) Marés de quadratura.



Fonte: O Autor (2024).

Corroborando com os resultados obtidos, Araújo, Mineiro e Cantalice (2011) afirmam que as marés se propagam pelo estuário comum do Recife quase em fase e sem amortecimento com relação à maré gerada no Porto, isto é, as cristas e cavas das ondas da maré coincidem com as previstas pelo DHN, na preamar e baixa-mar. Tal fato também foi comprovado por Pernambuco (2013), que realizou, em 2011, um monitoramento maregráfico em dois pontos do estuário (desembocadura do Rio Capibaribe e canal de acesso ao Porto do Recife, na Bacia do Pina) e observou coincidência entre as amplitudes de marés de sizígia medidas e previstas pelo DHN para o Porto do Recife.

5.2. ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA BACIA DO CANAL DERBY-TACARUNA ÀS MUDANÇAS DO CLIMA

Neste item, a análise de vulnerabilidade do canal Derby-Tacaruna foi conduzida a partir dos resultados da modelagem no SWMM para o cenário atual (Cenário C), resultante da calibração, e os cenários futuros (Cenários F1: 2040, F2: 2070 e F3: 2100) com base nas projeções climáticas de intensidades de chuva e elevação do NMM, definidos no item 4.2. Adicionalmente, os resultados para os cenários foram representados através de manchas de inundação, estimadas em ambiente GIS.

5.2.1 Cenário atual (calibração e validação)

O processo de calibração do modelo, conduzido pelo ajuste dos parâmetros físicos de entrada do módulo hidrológico e hidráulico do SWMM, resultou em índices estatísticos satisfatórios na simulação do Evento A [Prec: 127,7 mm e maré de quadratura, com amplitude máxima de 1,40 m], apresentando: $R^2=0,8902$ (forte) (Figura 45a); coeficiente de correlação (correl) de 0,94; coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) de 0,65, qualificado/razoável, conforme Hassan *et al.* (2017) e Lufi *et al.* (2020), $P_{BIAS}= 15,98\%$ (satisfatório), e $EMPA= 22,53\%$ (razoável). Como condição de contorno e utilização de estrutura adaptativa, o Evento A foi simulado considerando, apenas, o funcionamento da comporta do Eixo Norte, como de fato, foi operado o sistema no dia do sobredito evento, já que a comporta do Eixo Sul não estava funcionando e manteve-se fechada. Quanto à operação da comporta do Eixo Norte, a mesma esteve aberta durante todo evento, conforme detalhado no item 4.2. Durante a simulação, o SWMM acusou erros médios de continuidade para o escoamento superficial de -0,20% e

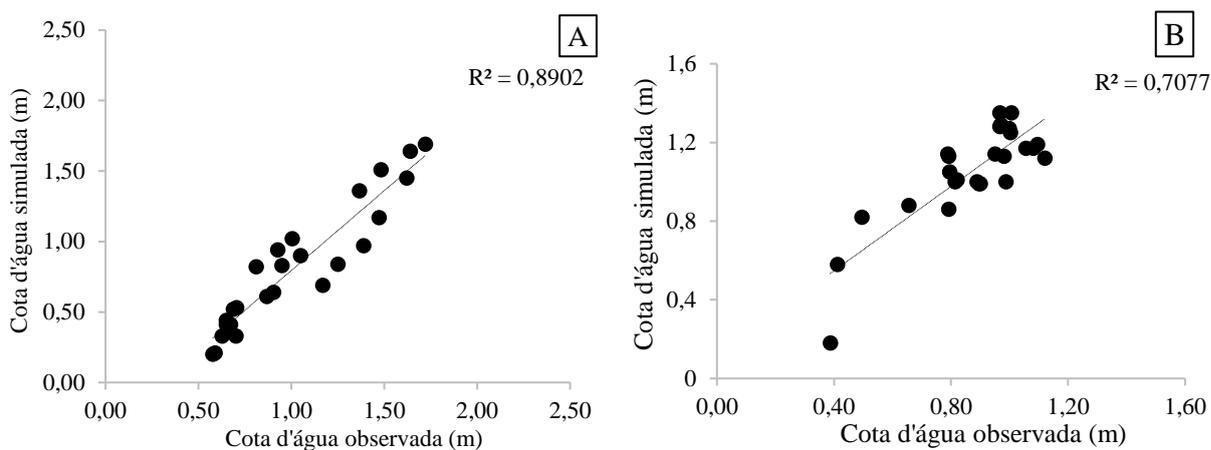
propagação de vazão -0,10%, estando dentro do limite da aceitabilidade, com valores menores que 10%, conforme estabelece Eletrobrás/PROCEL-SANEAR (2012).

A escolha do evento A, para a calibração do modelo, se deu por se tratar de uma precipitação excepcional, ocorrida no período de monitoramento dos níveis d'água utilizados nas condições de contorno da modelagem. Como foi visto nos resultados do item 5.1.3, quanto à frequência dos eventos extremos, com precipitações acima de 100 mm em 24 h, foi detectada tendência positiva e levemente significativa. Ainda foi ressaltado que 81% desses eventos ocorreram entre os meses de março a julho, que concentra o período chuvoso, considerando uma série histórica de dados de 57 anos. Com isso, o evento simulado nesta pesquisa, de preferência, deveria apresentar acumulados diários precipitados acima de 100 mm e, nesse caso, o Evento A, ocorrido em 12,5 horas entre os dias 24 e 25/05/2022 atende a esta premissa, com um total de 127,7 mm.

Outro ponto a se destacar refere-se às condições de contorno do sobredito evento. Na ocasião, a comporta do Eixo Sul (Português) não estava operando, fazendo com que a saída do escoamento do canal seja feita, apenas, pelo Eixo Norte (Tacaruna). No Eixo Norte, para o citado evento, a comporta manteve-se aberta durante a precipitação, conforme especificado no livro registro de operação das comportas, cedido pela Emlurb. Tal condição, fez com que o canal, que atualmente com a operação das comportas e do bombeamento funciona como uma espécie de reservatório alongado, resgatasse suas características funcionais de canal. Assim, a redução da quantidade de condições de contorno (considerando apenas a série de maré do Ponto A, na comporta do Eixo Norte - Tacaruna), tornou o processo de calibração dos parâmetros hidrológicos e hidráulicos do SWMM mais exequível.

Após a calibração dos parâmetros físicos de entrada, o modelo foi validado a partir do evento B [Prec: 98,4 mm]. No processo de validação, manteve-se os parâmetros físicos ajustados na calibração, realizando, apenas, a mudança do evento a ser simulado e das condições de contorno correspondentes. De maneira complementar e com testes estatísticos mais simplificados, a simulação do Evento B apresentou coeficiente de correlação (correl) de 0,86404 e coeficiente de determinação (R^2) de 0,7077 (forte) (Figura 45b). Durante a simulação da validação do modelo, o SWMM também reportou erros médios de continuidade para o escoamento superficial e de propagação de vazão abaixo de 10%, estando dentro do limite da aceitabilidade definido por Eletrobrás/PROCEL-SANEAR (2012).

Figura 45. Gráficos de calibração e validação: a) Evento A; e b) Evento B.

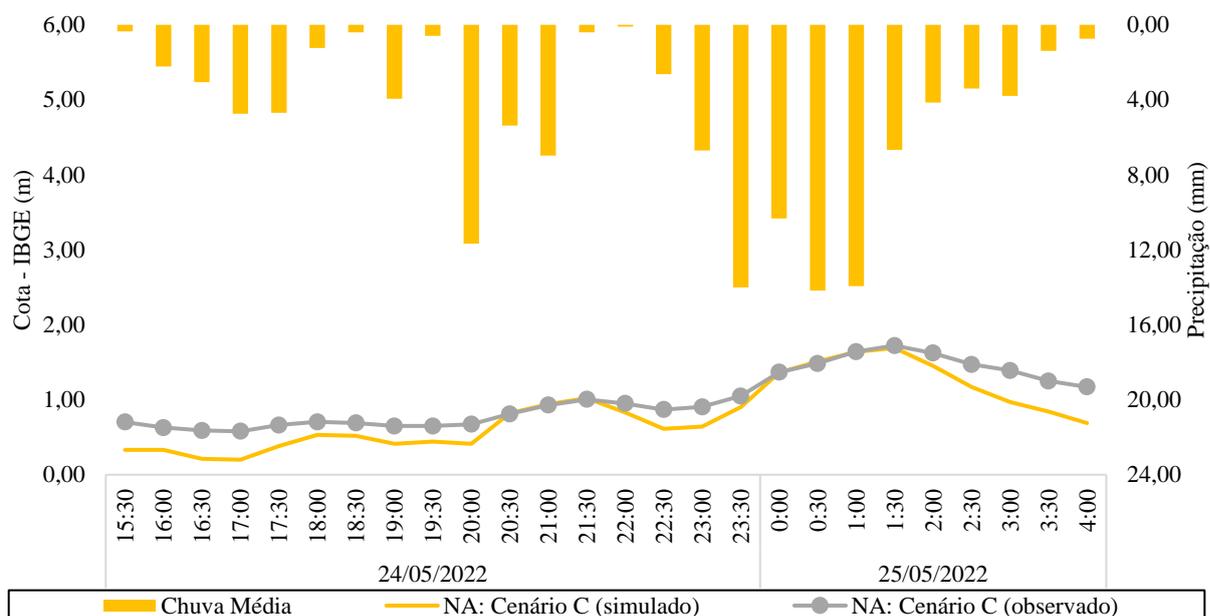


Fonte: O Autor (2024).

A Figura 46 apresenta a variação do nível d'água observado e simulado no Ponto C, para o Evento A, usado na calibração, definido nesta pesquisa como ponto de controle. Tal ponto encontra-se localizado nas imediações do Parque Amorim, região mais susceptível à transbordamentos do canal em eventos extremos de chuva e/ou inoperância da estrutura adaptativa atual. Observa-se, de maneira comparativa, um comportamento similar nas cotas (com referência do IBGE) dos níveis observado e simulado d'água, tornando, dessa maneira, o modelo representativo.

Para o sobredito evento de chuva, observou-se que o nível máximo foi atingido às 01h30, com a cota de 1,69 m (IBGE). Essa altimetria supera a cota da berma do canal, no Ponto C, que é de 1,43 m (IBGE) e se aproxima do nível do passeio, às margens do canal, que é de 1,83 m (IBGE).

Figura 46. Variação dos níveis d'água observados e simulados no Ponto C, considerando o Evento A.

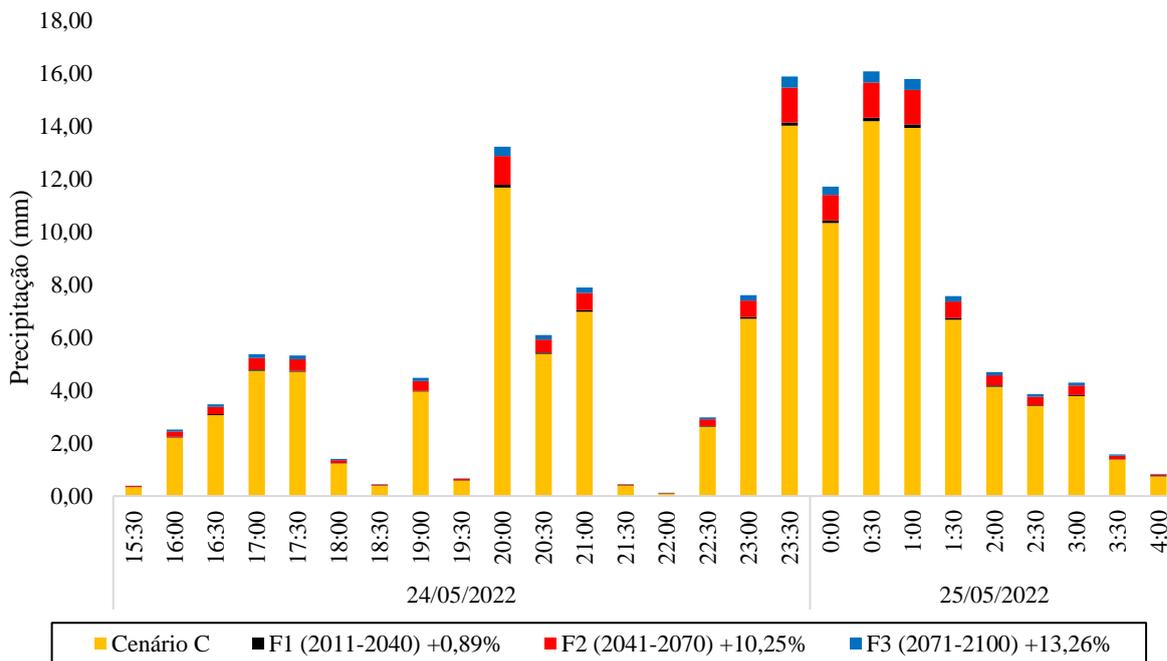


Fonte: O Autor (2024).

5.2.2. Cenários futuros (F1-2040, F2-2070 e F3-2100):

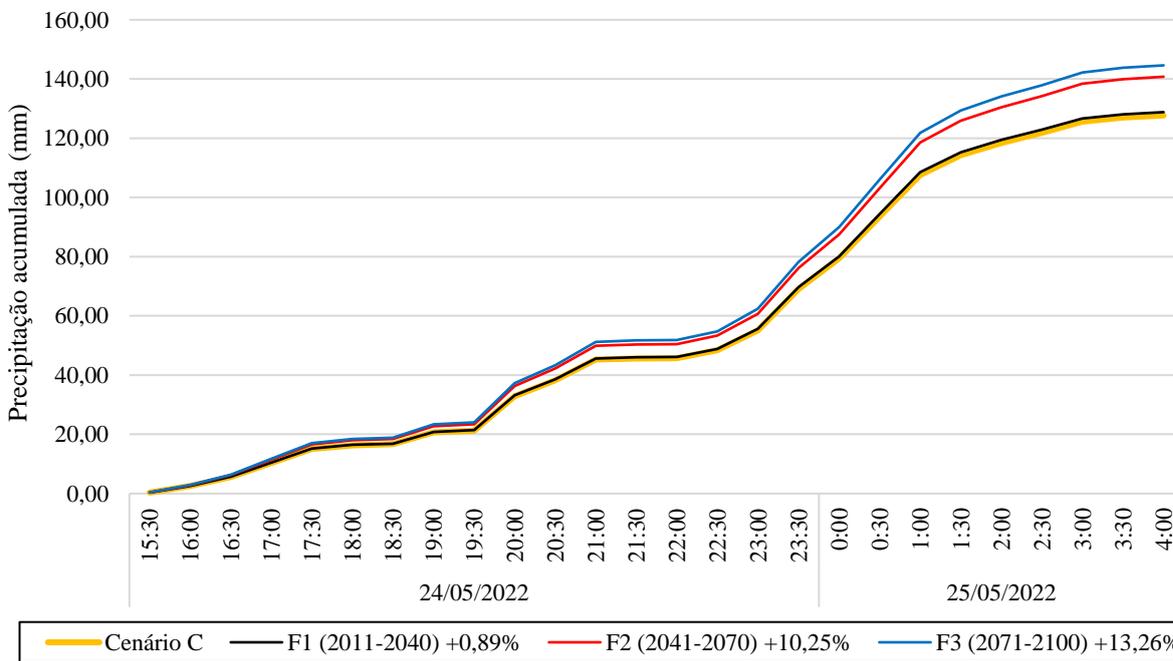
Para fins de análise do sistema atual frente aos cenários futuros, as condições operacionais da estrutura adaptativa existente, estabelecidas no cenário C, foram mantidas para os eventos de chuva considerados. Em termos de representação dos cenários futuros, a Figura 47 e a Figura 48 mostram o hietograma e a chuva acumulada, respectivamente, representativos para F1 (+0,89%), F2 (+10,25%) e F3 (+13,26%), considerando a precipitação do Evento A, utilizado no processo de calibração. As chuvas acumuladas projetadas para o futuro, considerando a mesma duração de 12,5 horas, seriam de: F1 = 128,84 mm; F2 = 140,79 mm e F3 = 144,63 mm. Já as intensidades média e máxima, foram calculadas em: F1 = 10,30 mm/h e 28,62 mm/h; F2 = 11,26 mm/h e 31,28 mm/h; F3 = 11,57 mm/h e 32,14 mm/h.

Figura 47. Hietograma representativo projetado para os cenários futuros, considerando o Evento A.



Fonte: O Autor (2024).

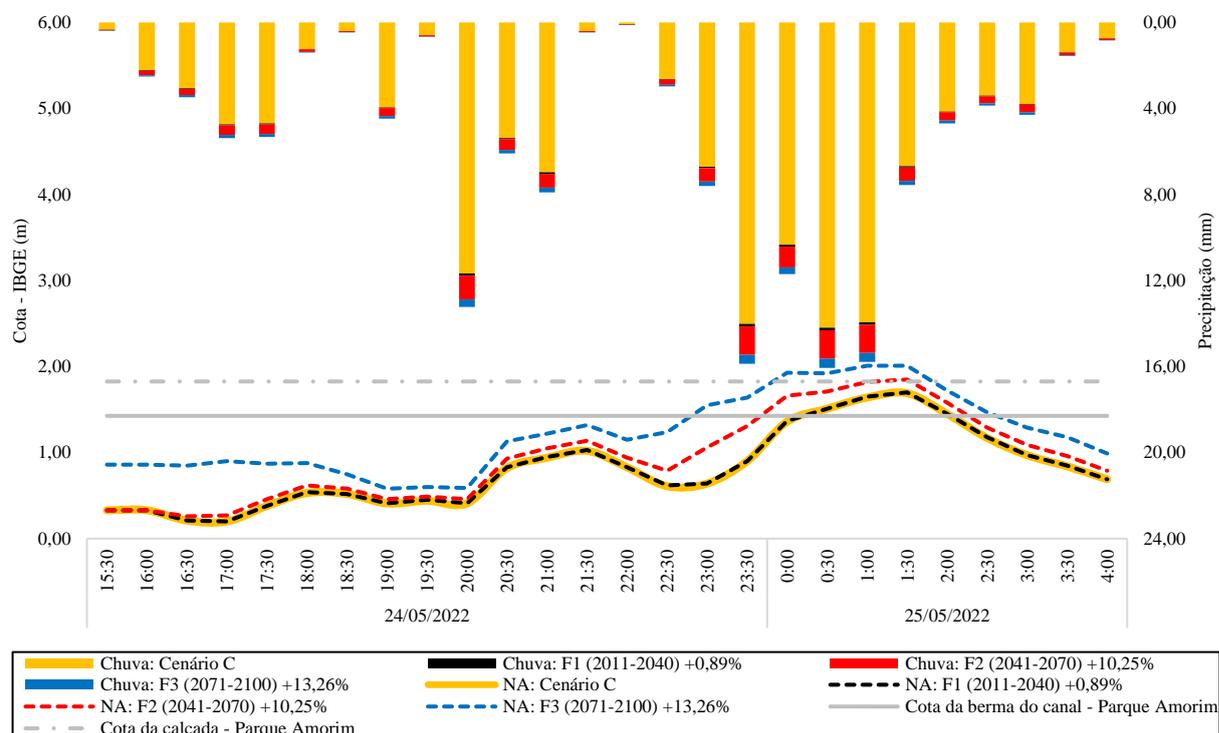
Figura 48. Chuvas acumuladas projetadas para os cenários futuros, considerando o Evento A.



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 49 ilustra a variação do nível d'água para os cenários futuros (2040, 2070 e 2100) em comparação ao cenário C no trecho mais vulnerável a transbordamentos do canal Derby-Tacaruna, localizado nas imediações do Parque Amorim (Ponto C).

Figura 49. Níveis d'água simulados no ponto C para os cenários futuros, considerando o Evento A.



Fonte: O Autor (2024).

Para o cenário F1 (Prec.= +0,89% e NMM= +0,0 m), observou-se um aumento médio de 0,5% do nível d'água no Ponto C, em comparação ao cenário C (simulado), durante as 12,5 horas do evento. Considerando, apenas, o comparativo da cota máxima, ocorrida no instante de 01h30, o aumento seria de 0,39%⁷, chegando a 1,70 m (IBGE). No cenário F2 (Prec.= +10,25% e NMM= +0,38 m), o aumento médio no nível d'água foi de 7,42%, enquanto que o nível d'água máximo elevou 6,20%, atingindo 1,85 m (IBGE). No cenário F3 (Prec.= +13,26% e NMM= +0,82 m), o aumento médio no nível d'água foi de 26,53%, enquanto que o nível d'água máximo aumentou em 12,40%, atingindo 2,01 m (IBGE).

A Tabela 22 mostra, em síntese, a análise de vulnerabilidade da macrodrenagem frente aos cenários projetados de mudança do clima, para o Ponto C, considerando as condições da infraestrutura adaptativa atual, conforme foi descrita anteriormente.

⁷ Os percentuais de incremento e redução nos níveis d'água foram calculados a partir das profundidades nos trechos analisados.

Tabela 22. Percentuais de incremento nos níveis d'água no Ponto C do Derby-Tacaruna frente às mudanças do clima, em comparação com o cenário C.

Cenário	Evento A Prec.: 127,7 mm, Δt: 12,5h, Maré de quadratura (Amplit. 1,40 m).		
	Nível d'água durante o evento (%)	Nível d'água máximo (%)	Transbordou?*
F1 Prec.= +0,89%; NMM= +0,00 m	+0,23%	+0,39%	NÃO
F2 Prec.= +10,25%; NMM= +0,38 m	+7,42%	+6,20%	SIM
F3 Prec.= +13,26%; NMM= +0,82 m	+26,53%	+12,40%	SIM

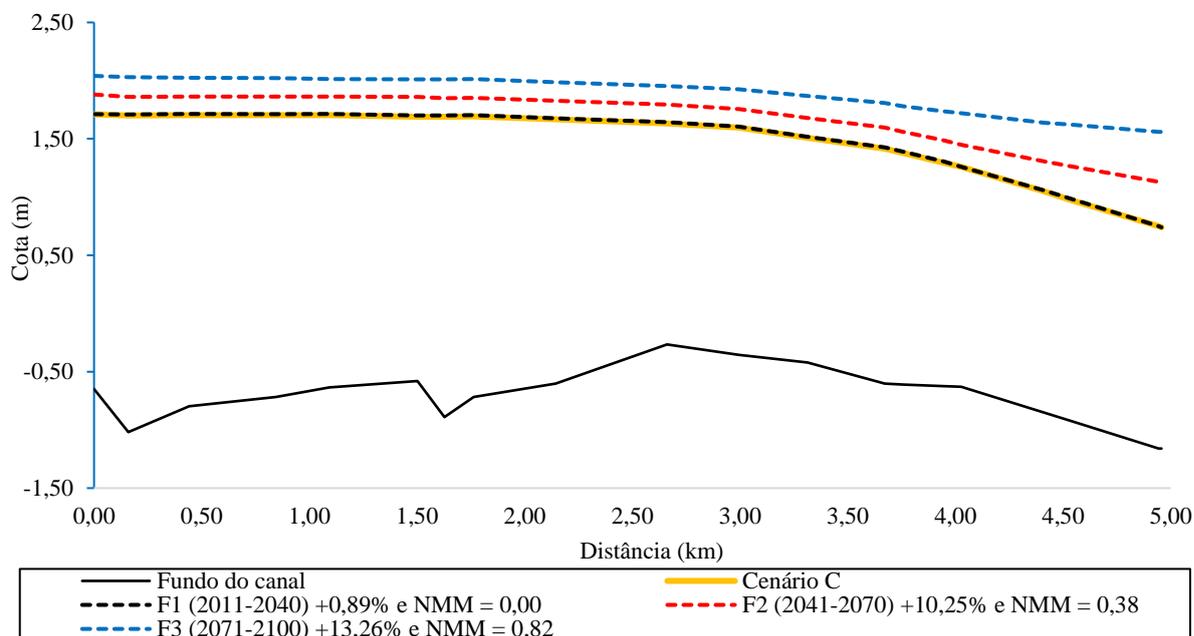
Nota: * Nesse caso, para análise do transbordamento, utilizou-se como referência o nível da calçada na cota de 1,80 m, no Ponto C (imediações do Parque Amorim). Porém, a berma da seção revestida do canal, no Ponto C, encontra-se na cota 1,40 m.

Fonte: O Autor (2024).

Dentre os cenários futuros analisados, apenas os cenários F2 e F3 promoveriam elevações no nível d'água suficientes para provocar transbordamentos no canal, principalmente nas imediações do Parque Amorim, chegando à cota altimétrica máxima de 2,01 m (IBGE), enquanto que a altimetria do local varia de 1,48 a 2,67 m (IBGE). É importante frisar que, além do impacto do aumento da intensidade das chuvas, diferentemente do cenário F1, foram previstas elevações do NMM de +0,38 m e +0,82 m para os cenários de 2070 e 2100, respectivamente, provocando o remanso e acesso das baixa-mares incrementadas ao canal, já que as preamares são bloqueadas pelas comportas.

A Figura 50 mostra o perfil hidráulico de níveis máximos ao longo do canal Derby-Tacaruna, para os cenários atual (C) e futuro (F1, F2 e F3). Observa-se que, em relação ao cenário C, o F1 teve uma pequena elevação no nível d'água do canal, em média 0,37%. É válido lembrar que tal alteração, pouco expressiva, é reflexo do cenário F1 simulado, que considerou, apenas, aumento na intensidade da chuva do Evento A, em 0,89%. Para o cenário F2, a elevação média no nível d'água foi de 9,62%, enquanto que para o cenário F3, o aumento foi de 20,46%. Para ambos os cenários, observa-se um expressivo aumento nos níveis d'água próximos ao Eixo Norte (5 km), resultado da influência direta das marés (ajustadas às elevações do NMM de +0,38 m e +0,82 m), com a comporta aberta. No Eixo oposto, Sul (0 km), tais variações não acompanharam o comportamento do Eixo Norte, uma vez que a comporta se manteve fechada nas simulações do Evento A (projetado para o futuro), bloqueando o efeito direto da maré.

Figura 50. Perfis hidráulicos com níveis máximos d'água simulados para os cenários C, F1, F2 e F3, a partir do Evento A.



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 51 mostra as manchas simuladas de máxima inundação na bacia do canal Derby-Tacaruna, considerando os cenários F1, F2 e F3 a partir do Evento A. Para o cenário F1, observou-se uma área inundada de 0,208 km², que representa cerca de 3,54% da área da bacia. No cenário F2, a área de inundação seria aumentada em 44,71%, em relação ao cenário F1 (similar ao cenário C), para 0,301 km², ou 5,13% da área da bacia do canal. Por fim, no cenário F3 a inundação alcançaria uma área de 0,441 km², com um aumento de 112,02% em relação ao cenário atual (C), representando cerca de 7,51% da bacia do Derby-Tacaruna. Em termos de volume inundado e/ou alagado, estima-se que para o cenário F1 seja de 146.545,5 m³, enquanto que para os cenários F2 e F3 sejam de 189.219,4 m³ e 247.551,2 m³, respectivamente.

As manchas espacializadas, mostradas na Figura 51, destacam as localidades mais vulneráveis às inundações e/ou alagamentos, na bacia do canal Derby-Tacaruna, em cenários de mudança de clima, considerando às condições de operação da infraestrutura adaptativa atual realizada durante o Evento A (comporta do Eixo Norte aberta, comporta do Eixo Sul fechada e sem funcionamento do sistema de bombeamento do Eixo Norte). Os mapas da Figura 51 revelam os bairros que seriam diretamente afetados com os cenários futuros simulados: Boa Vista, Ilha do Leite, Derby e Graças.

Figura 51. Manchas de inundações estimadas para os cenários futuros: F1, F2 e F3, a partir do Evento A.



Fonte: O Autor (2024).

Os locais vulneráveis, identificados nesta pesquisa, corroboram com o estudo elaborado por Fonseca Neto *et al.* (2022). No estudo foram avaliados, de forma espacial e quantitativa, a extensão das áreas inundadas por marés em dias de sol, a partir da elevação do NMM de 0,70 m e de uma maré de sizígia com amplitude máxima de 2,70 m (DHN), com as comportas dos Eixos Sul e Norte abertas, favorecendo, assim, a entrada do remanso da maré pela macrodrenagem do canal Derby-Tacaruna. Os autores destacaram, também, inundações em outros bairros: Paissandu, Campo Grande, Torreão e Santo Amaro. É válido lembrar que, diferente do estudo de Fonseca Neto *et al.* (2022), a pesquisa em tela simulou uma maré de quadratura, com amplitude de 1,40 m (com variações de NMM de +0,38 e +0,82), combinado com uma chuva de 127,7 mm (com variações de intensidade de +0,89%, +10,25% e 13,26%).

5.3. SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS ADAPTATIVAS NA BACIA DO CANAL DERBY-TACARUNA

Com base nos cenários futuros simulados [F1 (2011-2040): Prec.+0,89% e NMM= +0,00 m; F2 (2041-2070): Prec.= +10,25% e NMM= +0,38 m; e F3 (2071-2100): Prec.= +13,26% e NMM= +0,82 m], tomando por base o Evento A, foram modeladas estratégias a serem adotadas na bacia do Derby-Tacaruna, para a redução dos níveis d'água do canal, diminuindo assim, a sua vulnerabilidade frente às mudanças do clima.

5.3.1 Configuração da Estratégia 1

A Estratégia 1, simulada a partir do SWMM, visou avaliar a potencialidade da infraestrutura adaptativa atual em pleno funcionamento, considerando, no caso do Evento A, o funcionamento da comporta do Eixo Sul. Como durante o Evento A, no Eixo Norte, a comporta esteve aberta, então, a comporta do Eixo Sul, para efeitos de simulação, também permanecerá aberta durante todo o Evento A.

Além disso, também foram previstas a utilização de técnicas de controle do escoamento no lote, baseada na recomposição de área permeável. Tais medidas, também de cunho adaptativas, foram baseadas em projetos existentes para o local de estudo, bem como em instrumentos vigentes da Legislação do Uso e Ocupação do Solo do Recife (LUOS), baseado no Plano Diretor Urbano da cidade, que preconiza sobre a preservação da Taxa de Solo Natural (TSN) de 25% da área de um lote urbano. Dessa forma, a Estratégia 1 simulou os efeitos do

funcionamento da comporta do Eixo Sul e da adoção de infraestrutura verde nos lotes urbanos, considerando a preservação de áreas permeáveis.

Na bacia do canal Derby-Tacaruna, foram contabilizados 6.198 lotes urbanos, ocupando 3,34 km², cerca de 56,9% da área da bacia. Desse total, aproximadamente 2 km² são de área construída nos lotes, com 1,34 km² de áreas remanescentes, que quase sempre estão impermeabilizadas. Apesar de ser previsto em legislação, Lei nº 16.176/96 e Art. 65 (Recife, 1996), a Taxa de Solo Natural diante da realidade urbanística do Recife acaba não apresentando o efeito desejado, por conta da dificuldade de fiscalização. Monteiro (2010) destaca que a maioria dos proprietários dos imóveis realizam obras de reforma após a regularização junto à prefeitura, como pavimentação para o estacionamento de veículos, reduzindo bastante a área de solo natural, anteriormente preservado.

Em termos de infraestrutura urbana, representada por arruamentos, calçadas, praças, etc., tem-se uma área de 2,53 km², que representa cerca de 43,1% da área da bacia.

A Tabela 23 mostra os novos valores de CN para cada sub-bacia, além de definir os novos percentuais de áreas impermeáveis, considerando as Taxas de Solo Natural (TSN) nos lotes. Observa-se que na condição atual, a bacia do Derby-Tacaruna apresenta uma área impermeável de 97,28%, e com a preservação de TSN nos lotes, passaria a ter uma impermeabilização de 84,46%. Isso resultaria num aumento de áreas verdes em torno de 6 vezes da condição atual, passando de 2,72% para 15,54%.

Com a redução da área impermeável na bacia, observou-se, também, a diminuição nos valores de CN de 97,76 para 94,63. A redução discreta é reflexo do grupo hidrológico do solo em que a bacia está inserida, caracterizado por solos pouco profundos com camadas subsuperficiais que impedem o fluxo descendente da água ou solos com porcentagem elevada de argila (20 a 30%) e baixa capacidade de infiltração, entre 0,40 e 0,15 cm/h (Emlurb, 2016).

Tabela 23. Novos valores de CN das sub-bacias considerando a TSN dos lotes urbanos.

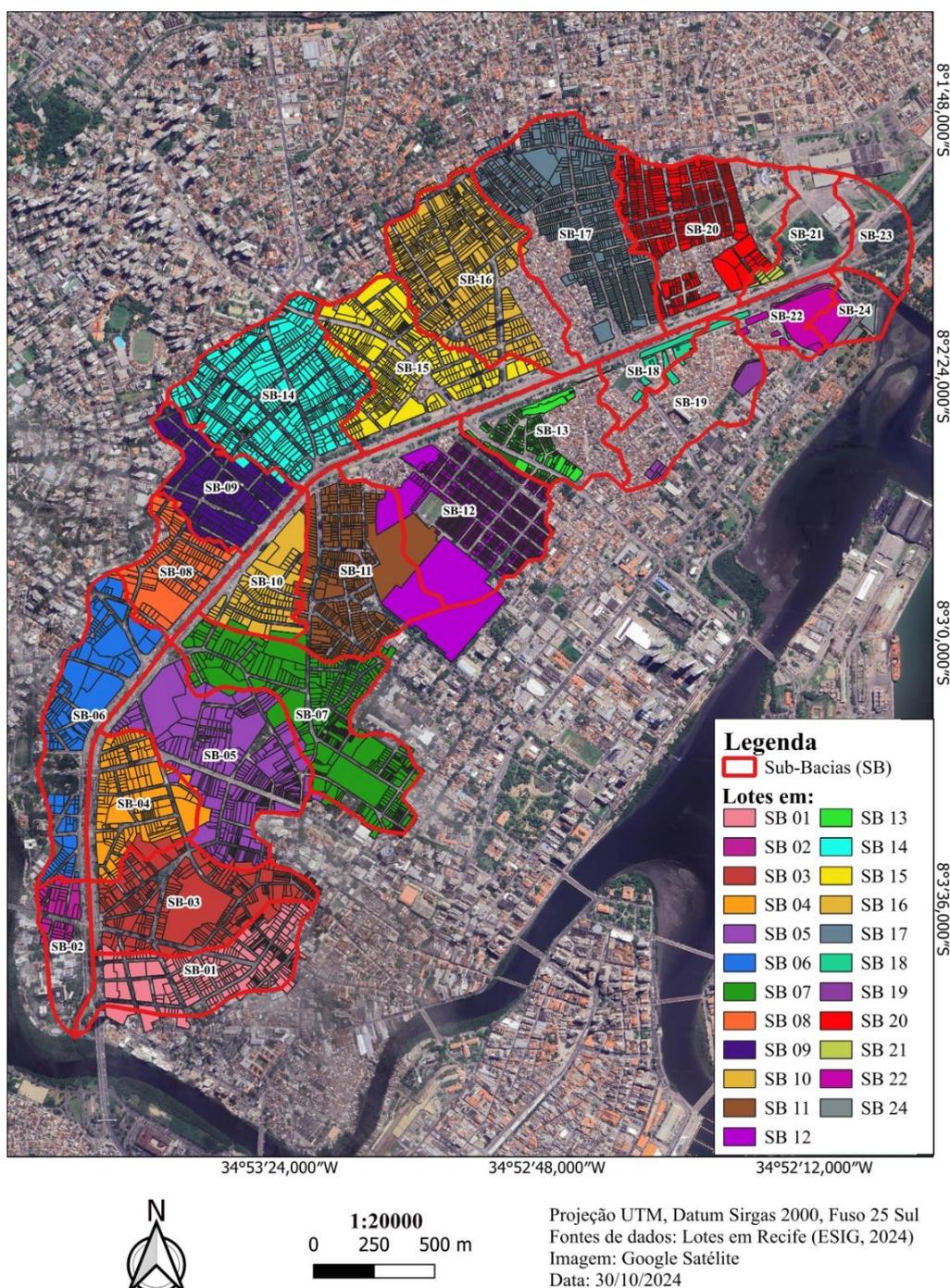
Sub-bacias	Quant. de lotes (und.)	Área total dos lotes (km ²)	Área total construída dos lotes (km ²)	Condição atual		Condição com TSN nos lotes	
				AI (%)*	CN	AI (%)	CN
1	254	0,1602	0,1130	100,00	98,43	83,03	94,28
2	50	0,0320	0,0174	100,00	98,43	92,73	96,65
3	254	0,2362	0,1555	100,00	98,43	79,28	93,36
4	162	0,1256	0,0876	100,00	98,43	84,61	94,66
5	302	0,3008	0,1786	98,80	98,13	79,42	93,40
6	151	0,1585	0,1144	97,81	97,89	84,10	94,54
7	434	0,3110	0,1997	100,00	98,43	78,76	93,23
8	127	0,1222	0,0671	100,00	98,43	79,63	93,45
9	173	0,1553	0,1182	100,00	98,43	78,78	93,24
10	106	0,1135	0,0531	99,07	98,20	80,03	93,55
11	344	0,1772	0,1074	99,66	98,34	85,64	94,92
12	835	0,2174	0,0814	99,69	98,35	85,31	94,84
13	268	0,0493	0,0254	100,00	98,43	94,21	97,01
14	479	0,2773	0,1889	100,00	98,43	82,36	94,11
15	339	0,1875	0,1092	100,00	98,43	85,07	94,78
16	583	0,2516	0,1256	100,00	98,43	83,49	94,39
17	786	0,2253	0,1155	100,00	98,43	87,54	95,38
18	8	0,0009	0,0008	100,00	98,43	99,73	98,36
19	31	0,0203	0,0023	100,00	98,43	97,67	97,86
20	486	0,1244	0,0561	98,86	98,15	90,36	96,07
21	9	0,0087	0,0010	86,04	95,01	84,36	94,60
22	7	0,0796	0,0778	98,87	98,15	77,91	93,03
23	0	0,0000	0,0000	73,88	92,04	73,88	92,04
24	10	0,0089	0,0014	82,24	94,08	79,16	93,33
TOTAL	6198	3,3437	1,9972	97,28	97,76	84,46	94,63

* AI = Área impermeável.

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 52 espacializa os lotes inseridos na bacia do canal Derby-Tacaruna, considerados na análise da Estratégia 1 para a preservação da Taxa de Solo Natural de 25%. Os lotes inseridos na bacia do canal Derby-Tacaruna foram discretizados por sub-bacia, no ArcGis, a partir de uma análise dos lotes que interseccionam ou estão totalmente inseridos dentro dos limites de cada sub-bacia. Para uma apuração mais acurada, quanto aos lotes que interseccionam os limites das sub-bacias, foram considerados apenas os lotes marginais com maior porção no interior da sub-bacia e com contribuição efetiva às vias.

Figura 52. Discretização dos lotes urbanos por sub-bacias.



5.3.2 Configuração da Estratégia 2

A Estratégia 2, simulada no SWMM, visou avaliar as condições da drenagem forçada no Eixo Norte do canal Derby-Tacaruna, considerando a sua capacidade máxima de bombeamento em $3 \text{ m}^3/\text{s}$, juntamente com a inclusão de uma nova estação de bombeamento no

Eixo Sul do canal, que também contará com o bombeamento total em torno de 3 m³/s, sendo 3 bombas com 1 m³/s cada. O sistema de bombas foi incorporado ao modelo SWMM por meio da curva da bomba, considerando a curva característica (ou curva de performance VUPX 0601 HZ), especificada pelo fornecedor ABS, que detém do modelo da bomba utilizada no Eixo Norte.

O projeto executivo para a construção das estações de bombeamento no canal, nos Eixos Norte e Sul, foi elaborado e intermediado pela Emlurb. As duas estações possuem a mesma capacidade de bombeamento, equivalente a um recalque total de 3 m³/s. Por questões orçamentárias, primeiramente foi executada a estação do Eixo Norte, que atualmente opera a 67% da sua capacidade. Para a simulação da Estratégia 2, considerou-se a capacidade máxima de bombeamento nos Eixos Norte e Sul, com um total de 6 m³/s sendo retirados do canal, enquanto que as comportas nestes eixos devem permanecer fechadas.

É válido frisar que tal condição avaliará a capacidade de bombeamento atual (Eixo Norte em pleno funcionamento, com 3 bombas operando) e futuro (Eixo Norte + Eixo Sul), partindo da hipótese de uso desse recurso para o Evento A, já que na situação, em específico, a drenagem forçada não foi utilizada.

5.3.3 Simulação das Estratégias 1 e 2

Após configurar as estratégias, a seguir, são apresentados os resultados das simulações a partir do Evento A, com base nos cenários futuros F1, F2 e F3. Na oportunidade, também foram analisadas outras possibilidades, mas não necessariamente foram simuladas no SWMM.

a) Estratégia 1:

A combinação entre o funcionamento da comporta do Eixo Sul, através de sua abertura, com a preservação do solo natural nos lotes da bacia, resultou, a partir do Evento A, nos percentuais de redução nos níveis d'água no Ponto C (região mais baixa da bacia do Derby-Tacaruna) e ao longo do canal, expressos na Tabela 24. Em termos médios, analisando a influência da Estratégia 1 no Ponto C, observou-se que a redução do nível máximo d'água na ocorrência do Evento A (projetado para o futuro) seria de 27,03% considerando o cenário F1, ou seja, apresentou uma cota máxima de 1,00 m (IBGE) e uma redução máxima na lâmina

d'água do canal, neste ponto, de 0,70 m. Para os cenários F2 e F3, as reduções foram de 20,80% e 12,76%, respectivamente, com níveis d'água reduzidos em 0,57 m e 0,37 m. Tomando por base o perfil hidráulico dos níveis máximos no canal Derby-Tacaruna (Figura 53), para o cenário F1, a combinação da Estratégia 1 resultou em reduções médias de 24,48% nos níveis d'água do canal, ao longo de sua extensão, enquanto que para os cenários F2 e F3, as reduções percentuais médias foram de 17,60% e 10,0%, respectivamente. É importante frisar que tais reduções são representativas do Evento A, considerando a ocorrência de uma maré de quadratura de 1,40 m de amplitude e que durante a ocorrência do sobredito evento de chuva, ocorria a baixa-mar.

Tabela 24. Percentuais médios de redução dos níveis d'água com a adoção da Estratégia 1 para os cenários F1, F2 e F3.

Cenário	Evento A Prec.: 127,7 mm, Δt: 12,5h, Maré de quadratura (Amplit. 1,40 m).		
	Nível d'água no Ponto C (%)	Nível d'água ao longo do canal (%)	Transbordou?*
F1 Prec.= +0,89%; NMM= +0,00 m	-27,03%	-24,48%	NÃO
F2 Prec.= +10,25%; NMM= +0,38 m	-20,80%	-17,60%	NÃO
F3 Prec.= +13,26%; NMM= +0,82 m	-12,76%	-10,00%	NÃO

Nota: * Nesse caso, para análise do transbordamento, utilizou-se como referência o nível da calçada na cota de 1,80 m, no Ponto C (imediações do Parque Amorim). Porém, a berma da seção revestida do canal, no Ponto C, encontra-se na cota 1,40 m.

Fonte: O Autor (2024).

Considerando uma análise baseada, apenas, no módulo hidrológico do SWMM, foi possível avaliar a influência das práticas de preservação do solo nos termos da Lei nº 16.176/96 (Recife, 1996), que prevê a preservação de uma Taxa de Solo Natural (TSN) de 25% em áreas de ZUP1, como é o caso da bacia do Derby-Tacaruna. Neste sentido, a análise do uso de TSN nos lotes mostrou que, diante do tipo e grupo hidrológico do solo da bacia, a infiltração em áreas permeáveis fica limitada e pouco interfere no escoamento superficial. Isso porque, de acordo com os dados da Emlurb (2016), que estabelece a relação entre o percentual de área impermeável (AI) e o valor de CN correspondente, o grupo hidrológico da bacia em estudo está enquadrada no tipo C, e, em termos médios, conforme mostrado anteriormente na Tabela 23, houve uma pequena variação de CN de 97,76 para 94,63. A Tabela 25 mostra a relação entre os valores de lâmina precipitada, escoada e infiltrada para os cenários simulados no SWMM.

Também é possível observar a variação dos coeficientes de escoamento, de 0,97 para 0,95, para as condições simuladas, considerando as 24 sub-bacias que compõe o sistema Derby-Tacaruna.

Tabela 25. Resultados reportados pelo módulo hidrológico (*runoff*) do SWMM com o emprego de TSN nos lotes da bacia.

Cenário	Precipitação (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Infiltração e Retenção (mm)	Coefficiente de Escoamento (C)
C _{ATUAL}	127,70	123,87	3,83	0,97
C _{TSN}	127,70	121,68	6,02	0,95
F1 _{TSN}	128,84	122,82	6,02	0,95
F2 _{TSN}	140,79	134,77	6,02	0,95
F3 _{TSN}	144,63	138,61	6,02	0,95

Fonte: O Autor (2024).

Em linhas gerais, observa-se que a manutenção de áreas verdes na bacia em estudo, em termos paisagísticos, traria o aspecto positivo de um urbanismo ecológico, além de atender às especificidades da Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) da cidade do Recife, podendo, também, interferir no microclima local. Em contrapartida, com relação ao controle do escoamento superficial, a técnica de infiltração resultaria num impacto pequeno, com retenção de volume de escoamento, em média, de 12.895 m³ (Tabela 26), que correspondente a reduções de volumes inundados nos cenários F1, F2 e F3 de 8,80%, 6,82% e 5,21%.

Tabela 26. Volumes de redução para o uso de TSN nos lotes da bacia Derby-Tacaruna, para os cenários simulados.

Volume de Escoamento	Cenário Atual (C)	F1	F2	F3
Condição Atual (m ³)	727.800	734.390	804.110	826.600
Condição com TSN (m ³)	714.940	721.530	791.200	813.650
Redução (m³)	12.860	12.860	12.910	12.950
% de Redução	1,77	1,75	1,61	1,57

Fonte: O Autor (2024).

A partir da análise apresentada, observa-se que as reduções nos níveis d'água, observados na Figura 53 ao longo do canal Derby-Tacaruna, foram promovidas, majoritariamente, pela operação das comportas do Eixo Norte e Sul, que se mantiveram abertas durante todo o evento, já que a redução no volume de escoamento nas 24 sub-bacias, promovida pela preservação do solo natural em 25% da área dos lotes, não chegou a 2% do volume gerado

pelo Evento A ($C = 127,70$ mm) e suas projeções climáticas ($F1 = 128,84$ mm, $F2 = 140,79$ mm, $F3 = 144,63$ mm).

Desse modo, em termos de alternativas compensatórias, como medida de adaptação, a utilização de técnicas de armazenagem e/ou retenção, poderia trazer um impacto na redução do volume de escoamento mais significativo. Nesse sentido, fazendo uma análise expedita do possível emprego dessa técnica, baseada na Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015), que estabelece, para as novas construções no Recife, a obrigatoriedade de inclusão de telhados verdes e/ou reservatórios de acumulação ou retardo em lotes com área ≥ 500 m², observou-se que o volume total retido nos lotes, inseridos na bacia do canal Derby-Tacaruna, poderia chegar a um volume de 16.045,83 m³. Tal volume refere-se à utilização da técnica de reservatório de acumulação, cuja capacidade é calculada pelo produto da área do lote (m²), com a constante adimensional de 0,15 e uma precipitação de 60 mm/h.

Na Tabela 27 é possível observar a variação de volumes retidos nos lotes por sub-bacias, bem como a quantidade de lotes enquadrados às especificidades da Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015). Observa-se que cerca de 22% dos lotes estariam enquadrados na sobredita Lei, em termos de área. Para fins de análise, vale ressaltar que a hipótese avaliada desconsidera o fato da sobredita Lei está enquadrada, apenas, aos novos lotes edificados no Recife, e amplia o enquadramento a todos os lotes edificados da cidade.

Tabela 27. Discretização dos lotes em termos de volume acumulado por sub-bacia e enquadramento na Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015).

(continua)

Sub-bacias	% da área total dos lotes em relação à área das sub-bacias	Volume total de acumulação nos reservatórios de lote (m ³)	Quantidade de lotes enquadrados na Lei nº 18.112/2015 (und)	Quantidade de lotes desenquadrados na Lei nº 18.112/2015 (und)
1	67,88%	845,63	68	186
2	29,09%	162,57	18	32
3	82,87%	1612,27	93	161
4	61,56%	896,82	80	82
5	77,52%	1696,76	119	183
6	54,84%	1092,68	63	88
7	84,96%	1786,54	118	316
8	81,48%	540,75	70	57
9	84,87%	1024,16	87	86
10	76,16%	524,86	38	68
11	56,07%	856,39	97	247
12	57,51%	4,56	1	834
13	23,15%	50,40	4	264

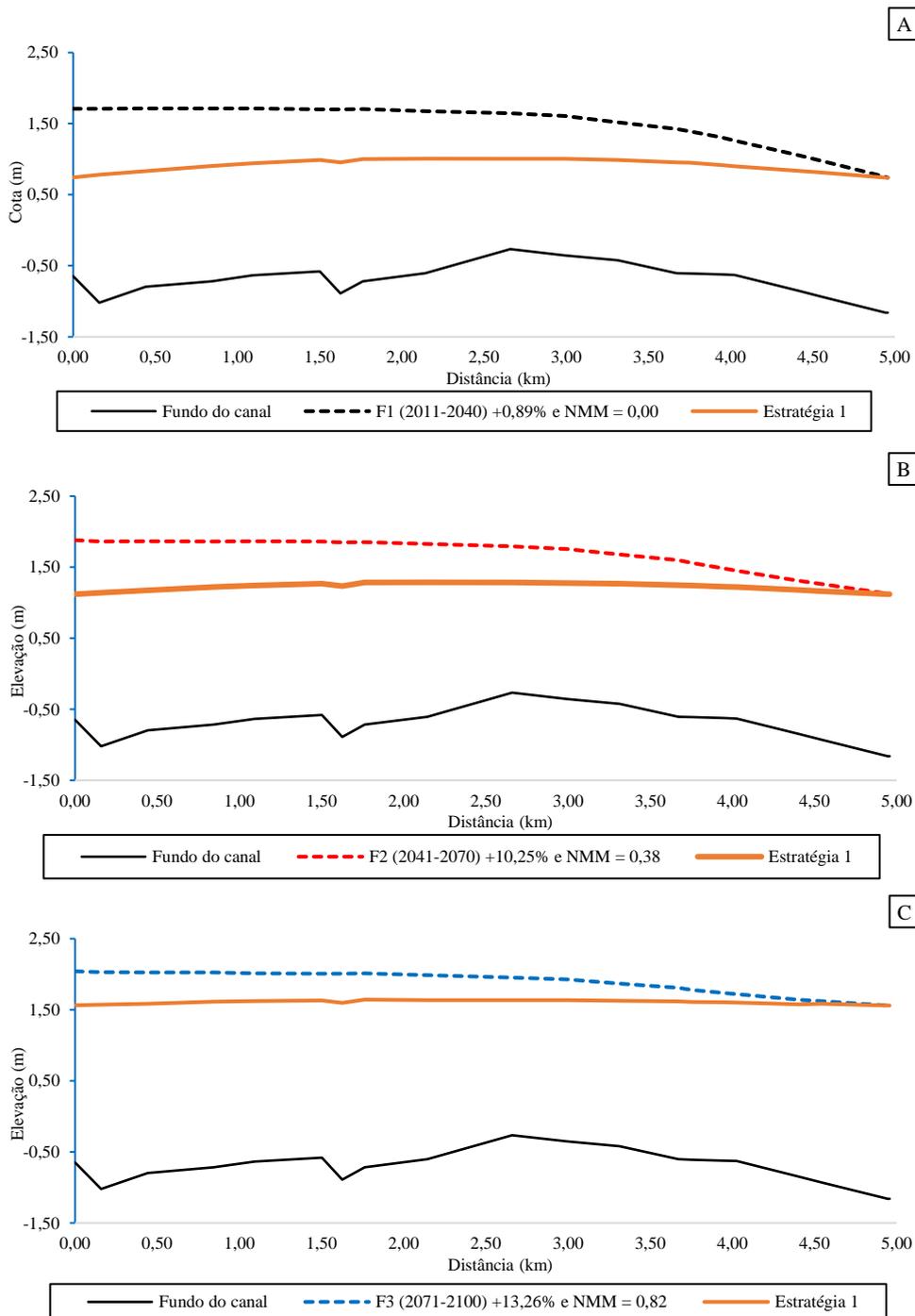
(conclusão)

Sub-bacias	% da área total dos lotes em relação à área das sub-bacias	Volume total de acumulação nos reservatórios de lote (m ³)	Quantidade de lotes enquadrados na Lei nº 18.112/2015 (und)	Quantidade de lotes desenquadrados na Lei nº 18.112/2015 (und)
14	70,57%	1582,62	179	300
15	59,73%	891,96	78	261
16	66,04%	977,32	131	452
17	49,86%	580,52	60	726
18	1,09%	0,00	0	8
19	9,30%	27,61	3	28
20	34,00%	167,47	26	460
21	6,72%	0,00	0	9
22	83,84%	692,63	1	6
23	0,00%	0,00	0	0
24	12,30%	31,30	1	9
TOTAL	54%	16.045,83 m³	1.335	4.863

Fonte: O Autor (2024).

Fazendo um comparativo do volume total retido em reservatórios de acumulação nos lotes, a partir da Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015), com os volumes de inundação simulados nos cenários F1 (146.545,5 m³), F2 (189.219,4) m³ e F3 (247.551,2 m³), é possível afirmar que com a aplicação da sobredita técnica de armazenagem, haveria uma redução desses volumes em torno de 10,95%, 8,48% e 6,48% para os respectivos cenários F1 (Prec.+0,89% e NMM= +0,00 m), F2 (Prec.= +10,25% e NMM= +0,38 m); e F3 (Prec.= +13,26% e NMM= +0,82 m). É importante frisar que essa redução foi promovida por 22% dos lotes da bacia, os quais estariam enquadrados na sobredita Lei.

Figura 53. Perfis hidráulicos dos níveis d'água no canal Derby-Tacaruna para a Estratégia 1 e cenários futuros.



Fonte: O Autor (2024).

b) Estratégia 2:

Para a análise da Estratégia 2, foram consideradas 3 condições que se encontram detalhadas na Tabela 28.

Na condição 1, admitiu-se que as comportas do Eixo Norte e Sul ficariam fechadas durante toda a ocorrência do Evento A (projetado para o futuro), impedindo, dessa forma, que

adentre ao canal o remanso da maré. Essa situação colocaria o canal como um grande reservatório, cuja saída d'água ocorreria, apenas, pelo sistema de drenagem forçada. Desse modo, para avaliar a eficiência do bombeamento, tempo de funcionamento das bombas seria equivalente à duração do evento, igual a 12,5 h. Para esse arranjo, os resultados da simulação mostraram que, considerando apenas a estação de bombeamento do Eixo Norte, com um total de 3,24 m³/s, haveria uma redução do volume escoado variando de 20-17% para os cenários atual e futuro (chuvas totais entre 127,7 e 144,63 mm, com 12,5 horas de duração). Com esse tempo de bombeamento, seria retirado o volume de 145.785 m³. Quando avaliada a operação das 6 bombas (Eixo Norte + Eixo Sul), para um total recalcado de 6,48 m³/s, seria retirado um volume total de 291.570 m³, promovendo uma redução de 40-35% do volume escoado (Tabela 28).

Para as condições 2 e 3, admitiu-se que as comportas ficariam fechadas durante 6,5 horas, que corresponderia ao intervalo de tempo da região de preamar (ou pico da maré). Após esse intervalo, na região de baixa-mar da curva da maré, as comportas seriam abertas para o escoamento das águas do canal. Na condição 2, considerou-se as primeiras 6,5 horas do Evento A (e suas projeções para o futuro), totalizando precipitações entre 45,90 e 51,95 mm, e para a condição 3, as últimas 6,5 horas, com totais precipitados entre 82 e 92,85 mm. Quando analisada a condição 2, os resultados mostraram que, considerando as 3 bombas do Eixo Norte, com vazão de 3,24 m³/s e volume bombeado de 75.807 m³, haveria uma redução do volume escoado variando de 30-26% para os cenários atual e futuro. Para a operação das 6 bombas (Eixo Norte + Eixo Sul), com vazão de recalque de 6,48 m³/s, seria retirado um volume total de 151.614 m³, promovendo uma redução de 61-53% do volume escoado (Tabela 28).

Para a condição 3, que contemplou um evento de chuva mais intenso, variando de 12 a 15 mm/h, as reduções variaram de 17-14%, considerando, apenas, o bombeamento no Eixo Norte, e de 33-28% para a drenagem forçada nos Eixos Norte e Sul (Tabela 28).

A Figura 54 e Figura 55 mostram a variação do nível d'água no Ponto C do canal Derby-Tacaruna, região de baixas elevações, considerando as 3 bombas do Eixo Norte e 6 bombas dos Eixos Norte e Sul, respectivamente. Observa-se que em ambas as situações, ocorreria o transbordamento do canal com cotas máximas variando de 2,28 a 2,61 m (IBGE), para a drenagem forçada do Eixo Norte, e 1,80 a 2,57 m (IBGE), para o bombeamento dos Eixos Norte e Sul, na condição 1. Fazendo um comparativo entre as cotas máximas, observa-se pouca influência do sistema de bombeamento do canal (com 3 ou 6 bombas) no Ponto C, em termos de redução dos níveis d'água, principalmente para as condições 1 e 3, que apresentam

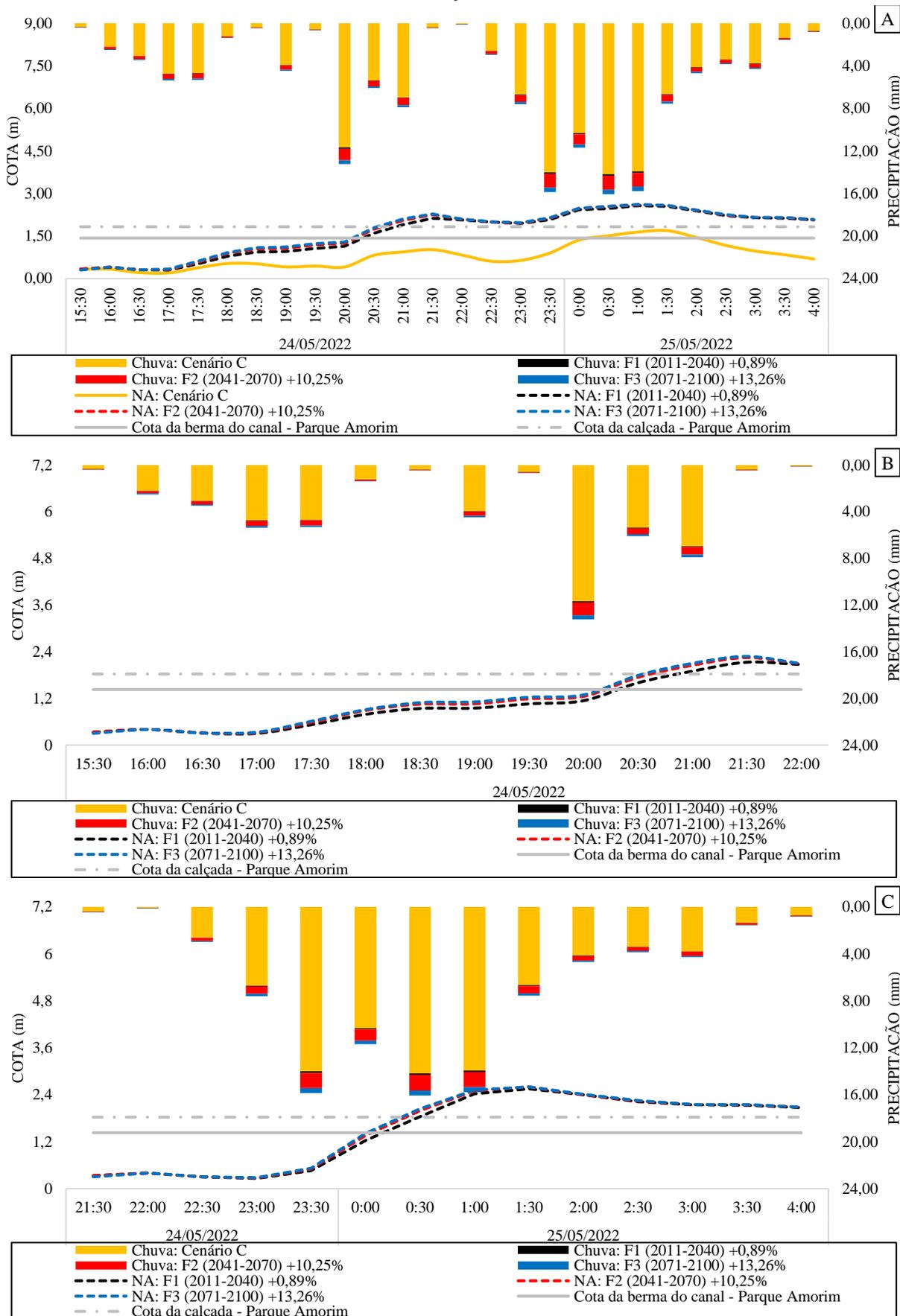
intensidades de chuva acima de 10 mm/h. Para a condição 2, com intensidades de chuva menores, observa-se que o funcionamento das 6 bombas conseguiria manter as cotas máximas dos cenários futuro dentro do canal (Figura 55b), enquanto que com 3 bombas em funcionamento, haveria transbordamento (Figura 54b).

Tabela 28. Síntese dos resultados do SWMM com a adoção da Estratégia 2, para diferentes condições simuladas.

CONDIÇÃO 1:					
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de bombeamento = duração da chuva = 12,5 h (com comportas fechadas durante o bombeamento) • Prec. C = 127,70 mm; Prec. F1 = 128,84 mm; Prec. F2 = 140,79 mm; Prec. F3 = 144,63 mm. • Intens. C = 10,22 mm/h; Intens. F1 = 10,30 mm/h; Intens. F2 = 11,26 mm/h; Intens. F3 = 11,57 mm/h. 					
Volume		Cenário Atual (C)	F1	F2	F3
Escoado (m ³)		727.800	734.390	804.110	826.600
Estratégia 2: Bombeamento	Eixo Norte 3 Bombas: 3,24 m ³ /s (m ³)	145.785	145.785	145.785	145.785
	Redução do Volume Escoado (%)	20,03	19,85	18,13	17,64
	Eixo Norte + Eixo Sul 6 Bombas: 6,48 m ³ /s (m ³)	291.570	291.570	291.570	291.570
	Redução do Volume Escoado (%)	40,06	39,70	36,26	35,27
CONDIÇÃO 2:					
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de bombeamento = duração da chuva = 6,5 h (com comportas fechadas para o bombeamento) • Prec. C = 45,90 mm; Prec. F1 = 46,27 mm; Prec. F2 = 50,56 mm; Prec. F3 = 51,95 mm. • Intens. C = 7,06 mm/h; Intens. F1 = 7,12 mm/h; Intens. F2 = 7,78 mm/h; Intens. F3 = 7,99 mm/h. 					
Volume		Cenário Atual (C)	F1	F2	F3
Escoado (m ³)		249.940	252.170	277.200	285.220
Estratégia 2: Bombeamento	Eixo Norte 3 Bombas: 3,24 m ³ /s (m ³)	75.807	75.807	75.807	75.807
	Redução do Volume Escoado (%)	30,33	30,06	27,35	26,58
	Eixo Norte + Eixo Sul 6 Bombas: 6,48 m ³ /s (m ³)	151.614	151.614	151.614	151.614
	Redução do Volume Escoado (%)	60,66	60,12	54,69	53,16
CONDIÇÃO 3:					
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de bombeamento = duração da chuva = 6,5 h (com comportas fechadas para o bombeamento) • Prec. C = 82,00 mm; Prec. F1 = 82,75 mm; Prec. F2 = 90,43 mm; Prec. F3 = 92,85 mm. • Intens. C = 12,62 mm/h; Intens. F1 = 12,73 mm/h; Intens. F2 = 13,91 mm/h; Intens. F3 = 14,28 mm/h 					
Volume		Cenário Atual (C)	F1	F2	F3
Escoado (m ³)		460.320	464.650	509.360	523.740
Estratégia 2: Bombeamento	Eixo Norte 3 Bombas: 3,24 m ³ /s (m ³)	75.807	75.807	75.807	75.807
	Redução do Volume Escoado (%)	16,47	16,31	14,88	14,47
	Eixo Norte + Eixo Sul 6 Bombas: 6,48 m ³ /s (m ³)	151.614	151.614	151.614	151.614
	Redução do Volume Escoado (%)	32,94	32,63	29,77	28,95

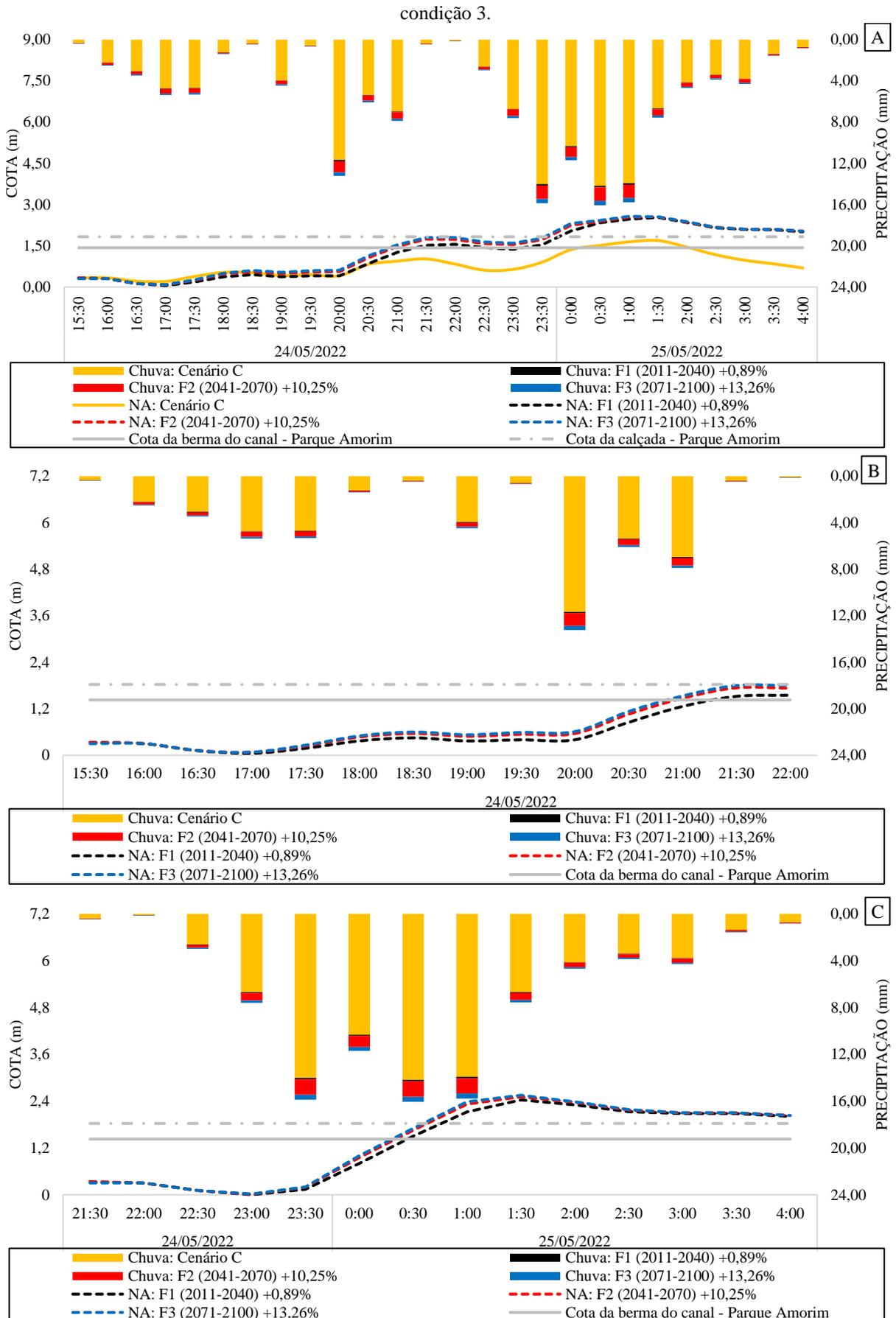
Fonte: O Autor (2024).

Figura 54. Nível d'água no Ponto C com o bombeamento no Eixo Norte: a) condição 1; b) condição 2; c) condição 3.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 55. Nível d'água no Ponto C com o bombeamento no Eixo Norte e Sul: a) condição 1; b) condição 2; c)



Fonte: O Autor (2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As consequências das ações antrópicas, que estão resultando nas alterações climáticas globais, vêm ganhando cada vez mais espaço no meio científico. Principalmente quanto às questões que dizem respeito à urbanização acelerada e desordenada das grandes cidades, associadas às baixas altitudes, pluviosidade elevada e sistemas de drenagens vulneráveis às oscilações da maré. Sendo assim, esta pesquisa buscou avaliar estratégias de adaptação e/ou readequação na infraestrutura de drenagem da bacia do canal Derby-Tacaruna, para enfrentar os alagamentos provenientes das mudanças climáticas, na cidade de Recife/PE.

Primeiramente, vale destacar que as tendências detectadas nas séries temporais das variáveis climatológicas analisadas, não podem ser atribuídas apenas às mudanças climáticas globais. Isso porque outros vários fatores, em nível local, podem ter contribuído para a modificação do clima no Recife, como por exemplo, a supressão de áreas vegetadas, a expansão e o adensamento urbano. Neste sentido, políticas públicas que disseminem mais espaços vegetados, não só contribuem para o controle de inundações, proporcionado pela infiltração e pela interceptação vegetal, como também favorecem um microclima urbano mais ameno e saudável.

Também, as séries temporais associadas às temperaturas mínima, média e máxima apontaram tendência positiva e estatisticamente significativa, indicando aumento desta variável, em torno de 1 °C, ao longo de 57 anos de dados. A partir dos anos 2000, os valores médios de temperatura mínima, média e máxima (mensal e anual) encontram-se acima da média histórica (1961-2017). Esse aumento agrava ainda mais a formação de ilhas de calor na cidade, resultado da urbanização e verticalização urbana.

Já nas séries de precipitações máximas e totais (mensal e anual), a regressão linear simples não apontou tendência significativa de redução, uma vez que os modelos lineares apresentaram baixos coeficientes de determinação. Em contrapartida, os testes de Mann-Kendall e Curvatura de Sen mostraram que, apenas para os meses de março e setembro, foi detectada tendência negativa e estatisticamente significativa nas séries temporais dos totais precipitados. Quanto à frequência dos eventos extremos, com precipitações acima de 100 mm em 24 h, foi detectada tendência positiva e levemente significativa. Vale ressaltar, que 81% desses eventos ocorreram entre os meses de março a julho, período chuvoso.

A partir de uma análise exploratória dos dados de marés previstas, no período de 2005 a 2017, observou-se que até 2010, as marés máximas no Porto do Recife eram da ordem de 2,50

m. Nos anos seguintes, observou-se a aparição de marés máximas da ordem de 2,70 m, sugerindo um aumento do nível médio do mar com o passar dos anos. Ainda sobre a análise dos dados, também se verificou que amplitudes de maré entre 0,8 e 2,2 m (com referência do zero hidrográfico do DHN – Marinha do Brasil) são mais frequentes nos meses mais chuvosos (maio, junho e julho).

O monitoramento das marés no Porto do Recife (Ponto D), realizada entre os meses de maio a outubro de 2021, mostraram, através de uma análise comparativa com os dados de marés previstas pela DHN, previsões de marés muito boas, apresentando parâmetros estatísticos como: R^2 de 0,9868, coeficiente de correlação (correl) de 0,9934 e coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) de 0,99. Quanto ao tempo de trânsito do remanso da maré até os exutórios Norte e Sul do canal Derby-Tacaruna, por se situarem no estuário comum dos rios Capibaribe e Beberibe, notou-se equivalência horária entre os picos de maré medidos no Ponto A (Tacaruna) com o Ponto D (Porto), revelando que o tempo de trânsito é nulo. No caso do Ponto B (Português), observou-se um tempo de trânsito médio de 15 minutos, quando comparado com a maré monitorada no Porto (Ponto D).

Na análise de vulnerabilidade da bacia do canal Derby-Tacaruna, feita através de modelagem no SWMM, mostrou que para a simulação do cenário atual (C), caracterizado pela chuva do dia 24 e 25 de maio de 2022, com total de 127,7 mm em 12,5 horas e amplitude de maré de quadratura de 1,40 m, a calibração dos parâmetros físicos do módulo hidráulico e hidrológico foram satisfatórios, com índices estatísticos de $R^2=0,8902$, coeficiente de correlação (correl) de 0,94, coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) de 0,65, $P_{BIAS}=15,98\%$, e $EMPA=22,53\%$. Tal calibração foi validada por uma precipitação de 98,4 mm, que apresentou coeficientes de correlação e determinação de 0,86 e 0,7077, respectivamente, demonstrando que o modelo é representativo. Com relação à simulação dos cenários futuros, para as condições de funcionamento atual da infraestrutura adaptativa existente e com base no evento de chuva utilizado na calibração do SWMM, para o cenário F1 (2040) observou-se uma área inundada que representa cerca de 3,54% da área da bacia. No cenário F2 (2070), a área de inundação seria de 5,13% da área da bacia, enquanto que o cenário F3 (2100), a inundação alcançaria uma área de cerca de 7,51% da bacia do Derby-Tacaruna. Em termos de volume inundado e/ou alagado, estima-se que para o cenário F1 seja de 146.545,5 m³, enquanto que para os cenários F2 e F3 sejam de 189.219,4 m³ e 247.551,2 m³, respectivamente.

Quanto à análise de estratégias adaptativas, observou-se que a Estratégia 1 de readequação da infraestrutura de drenagem urbana da bacia do Derby-Tacaruna, baseada no

funcionamento da comporta do Eixo Sul do canal e na preservação da Taxa de Solo Natural (TSN) nos lotes, reportaria em reduções médias de 24,48% para o cenário F1, nos níveis d'água do canal ao longo de sua extensão, enquanto que para os cenários F2 e F3, tais reduções seriam de 17,60% e 10,00%, respectivamente. Boa parte dessa redução estaria associada à operação da comporta no Eixo Sul, através de sua abertura, já que a influência da preservação da Taxa de Solo Natural (TSN) foi pouco significativa, com vistas ao grupo hidrológico e tipo de solo presente na bacia, enquadrado como tipo C, fazendo com que o valor médio do CN da bacia reduzisse de 97,76 para 94,63. Ainda sobre a Estratégia 1, foram analisadas, de forma não simulada, o impacto do uso de técnicas de armazenagem no lote (como reservatórios de acumulação), baseadas na Lei Municipal n. 18.112/2015 (Recife, 2015), já que há limitações para o emprego de técnicas de infiltração, diante das condições hidrológicas do solo local. Avaliando essa possibilidade, estimou-se uma retenção de volume escoado de 16.045,83 m³, que promoveria uma redução dos volumes de inundação do canal Derby-Tacaruna em torno de 10,95%, 8,48% e 6,48% para os respectivos cenários F1, F2 e F3.

Para a Estratégia 2, observou-se que, para as condições simuladas, o sistema de bombeamento atual, com o funcionamento de 3 bombas e vazão total de 3,24 m³/s, não evitaria o transbordamento do canal nas imediações do Parque Amorim, para os cenários futuros analisados. Quando avaliada a inclusão de uma nova estação de bombeamento no Eixo Sul, totalizando a vazão bombeada de 6,48 m³/s, para os cenários futuros simulados e intensidades de chuva menores que 10 mm/h, observou-se que não haveria transbordamento no sobredito local vulnerável do canal.

Os resultados obtidos acendem um sinal de alerta para o Recife, que já possui um sistema de drenagem fragilizado e altamente vulnerável às oscilações de maré. Com esse cenário, a adoção de medidas que contribuam para a adaptação do sistema de drenagem frente às mudanças do clima se faz necessária e urgente, a fim de tornar a cidade do Recife mais resiliente aos extremos climáticos.

6.1. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS E ATUALIZAÇÃO DOS DADOS

- Atualmente, a Emlurb, através da Prefeitura de Recife, tem instalado medidores de nível em pontos da macrodrenagem da cidade, a fim de monitorar a dinâmica fluvial dos cursos d'água e registrar dados para pesquisas, estudos e projetos. De maneira complementar a esse trabalho,

e como forma de contribuição desta Tese, sugere-se que as estações de monitoramento desta pesquisa, bem como os seus locais de instalação, possam ser continuadas pela Emlurb com a instalação de novos sensores de nível, dando sequência a série histórica de dados já levantados;

- Quanto às marés, não há uma régua maregráfica no Porto do Recife, bem como não há os registros dos níveis d'água. Assim, o conhecimento da variação da maré ao longo do dia é tido pela previsão da tábua do Porto, disponibilizada pela DHN. Para uma análise mais detalhada sobre as tendências relacionadas ao aumento do NMM ao longo do tempo, se faz necessário uma série histórica de dados monitorados mais robusta, e desse modo, com um horizonte de 6 meses de marés monitoradas nesta pesquisa, não é possível realizar previsões dessa natureza. Desse modo, ressalta-se a importância da continuidade do monitoramento realizado no Porto, atentando-se para a utilização de equipamentos mais resistentes às condições de maresia;
- Faz-se necessário investigar e/ou atualizar a relação de conversão da maré prevista pelo DHN em cota do IBGE, publicação do ano de 2000. De maneira preliminar, nesta Tese, foi possível observar uma diferença média em torno de 15-20 cm entre a maré medida e a maré prevista pelo DHN (convertida para o IBGE subtraindo 1,14 m) no Porto do Recife. É válido frisar que outros fatores podem ter contribuído para essa diferença, como: a precisão do equipamento de monitoramento, o impacto da maresia nos sensores e a instabilidade no nível d'água, pois o local da antiga régua maregráfica fica em área de atracação de navios;
- Com relação aos dados de seções transversais da macrodrenagem da cidade, disponibilizados pela Emlurb e levantados no âmbito do PDDR em 2016, faz-se necessária a atualização das cotas de fundo dos canais, diante das mudanças promovidas por assoreamentos e dragagens, e compatibilização com outros dados topográficos, como o PE3D;
- Quanto ao cadastro da rede de microdrenagem, a complementação dos dados existentes (levantados no âmbito do PDDR de 2016) atribuindo cotas, geometria dos condutos e extensão das tubulações, promoverá um melhor refinamento das áreas de contribuição em cada subsistemas, além de permitir análises agrupadas dos sistemas de micro e macrodrenagem;
- Avaliar outros eventos de chuva combinados com maré, contemplando diferentes situações de marés de sizígia e quadratura, como: chuva + baixa-mar de sizígia; chuva + preamar de sizígia e quadratura. Através dessas combinações, será possível analisar, também, a vulnerabilidade do sistema Derby-Tacaruna para situações diferentes da simulada nesta Tese, que se baseou em um evento extremo de chuva acima de 100 mm combinado com baixa-mar de quadratura. Ademais, esses eventos podem aprimorar a calibração realizada e, inclusive, podem ser adotadas metodologias de calibração automática do SWMM; e

- Avaliar, através de modelagem hidrológica e hidráulica, a inclusão de técnicas de armazenagem ou outras técnicas localizadas de retenção, como o emprego de telhados verdes, a partir do mapeamento e discretização dos lotes da bacia estudada, feito nesta Tese, para avaliar a redução dos níveis d'água no canal Derby-Tacaruna para os diferentes cenários de mudança do clima.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, S.; AICH, V.; ALBRECHT, T.; BAARSCH, F. BOIT, A.; TRUJILLO, N. C.; WAHA, K. **Latin America and the Caribbean: 4o Turn down the heat - confronting the new climate normal.** World Bank Group. v. 2, 2014, 275p.
- AGUIAR, L. S.; AMARO, V. E.; ARAÚJO, P. V. N.; SANTOS, A. L. S. Geotecnologias de Baixo Custo Aplicadas à Avaliação de Risco por Inundação em Áreas Urbanas Costeiras em Cenários de Mudanças Climáticas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 42, 2018, p. 267-290.
- ALCOFORADO, R. G. **Simulação hidráulico-hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos:** suporte de informações espaciais de alta resolução. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2006. 139 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos:** desafios para a gestão. Brasília, 2010. 20 p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Estação de monitoramento do Cais Mauá C6.** 2024. Disponível em:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTRjZDlmYjgtNzAzMS00ZTFmLTlmZDAtNzEwNjM0MDU0NTJhIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGltNDY5YS04YjRkLTkyN2ZjZDFiYWY4OCJ9> Acesso em: 25 ago. 2024.
- ANDIMUTHU, R.; KANDASAMY, P.; MUDGAL, B. V., JEGANATHAN, A.; BALU, A.; SANKAR, G. Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7783, 2019.
- ARAÚJO, A. M.; MINEIRO, A. L. B.; CANTALICE, J. R. B. Estimativa do potencial de sedimentação e erosão: caso Manguezal do Pina, Recife (PE). **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 2, pp. 133-140, 2011.
- ARIYARATHNA, I. S.; ABEYRATHNA, W. P.; JAMEI, E.; CHAU, H. A Review of the Application of Blue-Green Infrastructure (BGI) as an Effective Urban Flood Mitigation Strategy for Livable and Healthy Cities in Australia. **Architecture**, v. 3, n. 461, p. 461-476, 2023.
- ARORA, V.K.; SCINOCCA, J. F.; BOER G. J.; CHRISTIAN, J. R.; DENMAN, K. L.; FLATO, G. M.; KHARIN, V. V.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-6, 2011.
- BABOVIC, F.; MIJIC, A.; MADANI, K. Decision making under deep uncertainty for adapting urban drainage systems to change. **Urban Water Journal**, v. 15, n. 6, p. 552-560, 2018.

BAI, H.; DONG, X.; ZENG, S. H.; CHEN, J. Assessing the potential impact of future precipitation trends on urban drainage systems under multiple climate change scenarios. **International Journal of Global**, v. 10, n. 4, 2015.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318p.

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

BOLDRIN, A. J. **Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas-SP, 2014. 171 p.

BOQNEWS. **Ressaca e maré alta provocam alagamentos na região**. 2016. Disponível em: <http://www.boqnews.com/cidades/ressaca-e-mare-alta-provocam-alagamentos-na-regiao/>. Acesso em: 01 ago. 2019.

BRAUN, S.; AUMOND, J. J. Simulação de elevação do nível do mar na cidade de Joinville (SC). *In: XVII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL (ENANPUR)*, São Paulo - SP, 2017, p. 1-17.

BROWN, S.; NICHOLLS, R.; WOODROFFE, C.; HANSON, S.; HINKEL, J.; KEBEDE, A.S.; NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T. Sea-Level Rise Impacts and Responses: A Global Perspective. *In: FINKL CW EDITOR. Coastal Hazards*, Springer Netherlands, 2013, p. 117–149.

BURBRIDGE, P. **Global change and the coastal challenge**. *In: PROC LITTORAL 2010 – ADAPTING TO GLOBAL CHANGE AT THE COAST*. EDP Sciences Web of Conferences, 2011, p. 1-1.

BURKETT, V. R.; ZILKOSKI, D. B.; HART, D. A. Sea-Level Rise and Subsidence: Implications for Flooding in New Orleans, Louisiana. *In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY SUBSIDENCE INTEREST GROUP CONFERENCE: proceedings of the Technical Meeting*, Galveston, Texas, 2003, p. 63-70.

BURKETT, V. R.; ZILKOSKI, D. B.; HART, D. A. Sea-level rise and subsidence: implications for flooding in New Orleans, Louisiana. *In: SUBSIDENCE INTEREST GROUP CONFERENCE, Proceedings of the Technical Meeting*. Galveston, Texas. 2001. p. 27-29.

C40. Cities Climate Leadership Group. **Climate change adaptation in delta cities: Good practice guide**. 2016, 27p.

CABRAL, J. J. S. P.; GUSMÃO, A. D.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; BARROS, E. N. Mudanças climáticas e subsidência do terreno como dificuldades para a gestão urbana de uma avenida marginal de curso d'água em cidade costeira. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, p. 436-460, 2021.

CARBONELL, A.; MEFFERT, D. J. **Climate Change and the Resilience of New Orleans: the Adaptation of Deltaic Urban Form**. *In: Commissioned Research Report for the World Bank 2009 Urban Research Symposium*, 2009, 39p.

CARVALHO, S. A. D.; FURTADO, A. T. Os desafios da adaptação às mudanças climáticas globais. **CLIMACOM cultura científica - pesquisa, jornalismo e arte**, v. 2, p. 1-9, 2015.

CHURCH, J. A.; CLARK, P. U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J. M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M. A.; MILNE, G. A.; NEREM, R. S.; NUNN, P. D.; PAYNE, A. J.; PFEFFER, W. T.; STAMMER, D.; UNNIKRISHNAN, A. S. **Sea Level Change**. In: *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

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

CLEMENTE, M. F.; D'AMBROSIO, V.; DI MARTINO, F.; MIRAGLIA, V. Quantify the Contribution of Nature-Based Solutions in Reducing the Impacts of Hydro-Meteorological Hazards in the Urban Environment: A Case Study in Naples, Italy. **Land**, v. 12, n. 569, p. 1-20, 2023.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE1, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 1051–1075, 2011.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

COSTA, M. B. S. F.; MALLMANN, D. L. B.; PONTES, P. M.; ARAÚJO, M. Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 341- 349, 2010.

DAVID, L. M.; CARDOSO, M. A. **Adaptação às alterações climáticas de sistemas de drenagem urbana: medidas para o efeito combinado da precipitação e da subida do nível do mar**. In: 15º Encontro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Portugal, 2012, 17p.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOU, D.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390-401, 2019.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207-217, jan./mar. 2016.

DEFESA CIVIL. **Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 20/8**. Disponível em: <https://www.defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-10-7-66b67813ba21f-66c4eed627af9>. Acesso em 25 ago. 2024.

EMLURB. Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana. **Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife** (Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente) – Versão cedida em visita técnica. Recife, 2016. 333 p.

_____. Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana. **Nota Técnica 03/2022: Comportamento Hídrico do Canal Derby Tacaruna** – Versão cedida em visita técnica. Recife, 2022. 25 p.

ESIG. Informações Geográficas do Recife. 2016. **Consulta Drenagem Recife**. Disponível: <https://esigportal.recife.pe.gov.br/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=759ef72eeac244fc822e618db0af235b>. Acesso em: 25 fev. 2019.

_____. Informações Geográficas do Recife. **Dados vetoriais do Recife**. 2014. Disponível em: <http://www.recife.pe.gov.br/ESIG>. Acesso em: 25 fev. 2019.

FERNANDES, M. C. L. **Aquecimento global e possível expansão volumétrica das águas do oceano Atlântico na costa do NE do Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2008, 62 p.

FIDEM. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana do Recife**. Disponível na Emlurb (Versão Impressa), Recife, 1980.

FOLHA PE. **Canal da avenida Agamenon Magalhães transborda**. 2019. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/noticias/noticias/recife/2019/09/02/NWS,115201,70,749,NOTICIAS,2190-CANAL-AVENIDA-AGAMENON-MAGALHAES-TRANSBORDA-VEJA-FOTOS.aspx> Acesso em: 25 set. 2019.

FONSECA, R. G. **Risco hidrológico: precipitações extremas, enchentes e alagamentos na cidade de Ituiutaba (MG)**, 2017. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 2017, 151p.

FONSECA NETO, G. C.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA, A. C. Áreas vulneráveis ao aumento do nível do mar em cidades costeiras: um estudo na cidade do Recife, Brasil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 12, p. 20-27, 2022.

FONSECA NETO, G. C. **Vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho cavouco em Recife em resposta às mudanças climáticas e à abertura das comportas da barragem de Carpina**. 2018. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2018, 86p.

FONSECA NETO, G.; NEVES, Y.; SILVA JUNIOR, M.; RODRIGUES, A.; ARAÚJO FILHO, P.; CABRAL, J.; FERREIRA, E.; GOMES, M.; SOUSA, S. **Estimativa do nível de cheia em riacho urbano sob o efeito de chuvas torrenciais e da elevação do nível do mar**. In: Anais do 13º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Porto, p. 1-12, 2017.

FRAILE-JURADO, P.; ÁLVAREZ-FRANCOSO, J. L.; GUIADO-PINTADO, E.; SÁNCHEZ-CARNERO, N.; OJEDA-ZÚJAR, J.; LEATHERMAN, S. P. Mapping inundation probability due to increasing sea level rise along El Puerto de Santa María (SW Spain). **Nature Hazards**, v. 87, n. 2, p. 581-598, 2017.

HINKEL, J.; VAN VUUREN, D. P.; NICHOLLS, R. J.; KLEIN, R. J. T. The effects of mitigation and adaptation on coastal impacts in the 21st century. **Climate Change**, v. 117, n. 4, p. 783-794, 2013.

HÖLBIG, C. A.; MAZZONETTO, A.; BORELLA, F.; PAVAN, W.; FERNANDES, J. M. C.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; CHOU, S. C. PROJETA platform: accessing high resolution climate change projections over Central and South America using the Eta model. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 1, p. 71-81, 2018.

HUONG, H. T. L.; PATHIRANA, A. Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 379–394, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 dez. 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PIB per capita (2016)**. 2016a. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 dez. 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia, Rio de Janeiro, 2016b, 61p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2022**. 2022. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 ago. de 2023.

INMET (2021). **Balando do Inverno de 2021 nas capitais Recife-PE e João Pessoa-PB**. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/BALAN%C3%87O-RECIFE-inverno_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 08 out. de 2024.

IPCC. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, 976 p.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. 582p.

IPCC. Summary for Policymakers. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151p.

- JIANG, L.; CHEN, Y.; WANG, H. Urban flood simulation based on the SWMM model. **Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources**, v. 368, p. 186-191, 2015.
- JONKMAN, S. N., HILLEN, M. M., NICHOLS, R. J., KANNING, W., VAN LEDDEN, M. Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise - New Estimates and Their Implications. **Journal of Coastal Research**, v. 29, n. 5, p. 1212-1226, 2013.
- KANG, N.; KIM, S.; KIM, Y.; NOH, H.; HONG, S. J.; KIM, H. S. Urban Drainage System Improvement for Climate Change Adaptation. **Water**, v. 8, n. 268, p. 1-16, 2016.
- KIRSHEN, P.; CAPUTO, L.; VOGEL, R. M.; MATHISEN, P.; ROSNER, A.; RENAUD, T. Adapting Urban Infrastructure to Climate Change: A Drainage Case Study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 4, 11 p. 2015.
- KHODADAD, M.; AGUILAR-BARAJAS, I.; KHAN, A. Z. Green Infrastructure for Urban Flood Resilience: A Review of Recent Literature on Bibliometrics, Methodologies, and Typologies. **Water**, v. 15, n. 523, p. 1-24, 2023.
- LAFAYETTE, F. B.; SILVA, M. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, P. O.; GUSMÃO, R. D. **Plano de gestão da manutenção da rede de drenagem da cidade do Recife**. In: Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió, p. 1-10, 2018.
- LEWIS, C. D. **Demand Forecasting and Inventory Control**. A computer aided learning approach. Woodhead Publishing Ltd, 1997, 157p.
- LUFU, S.; ERY, S.; RISPININGTATI, R. Hydrological Analysis of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Data in Lesti Sub Watershed. **Civil and Environmental Science** v. 3, n. 1, p. 018-030, 2020.
- MACEDO, F. V. C. B. **Avaliação de Estratégias para Beneficiação de Drenagem Pluvial Urbana em Cenários de Alterações Climáticas: Caso de Estudo da Bacia Bento Ferreira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Técnico de Lisboa, Lisboa, 2017, 124 p.
- MARENGO, J.; MULLER-KARGER, F.; PELLING, M.; REYNOLDS, C. J.; MERRILL, S. B.; NUNES, L. H.; PATERSON, S.; GRAY, A. J.; LOCKMAN, J. T.; KARTEZ, J.; MOREIRA, F. A.; GRECO, R.; HARARI, J.; SOUZA, C. R. G.; ALVES, L. M.; HOSOKAWA, E. K.; TABUCHI, E. K. An Integrated Framework to Analyze Local Decision Making and Adaptation to Sea Level Rise in Coastal Regions in Selsey (UK), Broward County (USA), and Santos (Brazil). **American Journal of Climate Change**, v. 6, p. 403-424, 2017.
- MARENGO, J. A.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A.P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C.A.; DOLIF, G.; GONCALVES, D.; ASSIS DIAS, M.; CUARTAS, L.A.; BENDER, F.; RAMOS, A.M.; MANTOVANI, J.R.; ALVALA, R.C.; MORAES, O.L. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, 39, p. 100545, 2023.
- MENDONÇA, M. L. F.; SILVA, L. R. A. **Áreas da cidade passíveis de alagamento pela elevação do nível do mar**. In: Coleção Estudos Cariocas, Rio de Janeiro, 53 p. 2008.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorol Atmos Phys**, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012.

MESQUITA, D. A.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, G. S.; SILVA, M. N. A.; SILVEIRA, R. N. P. O. **Análise de tendência em série temporal, estação pluviométrica São Francisco, Laranjal do Jari – AP**. In: Anais do Congresso ABES FENASAN 2017, São Paulo – SP, out. 2017.

MIGUEZ, M. G.; FERNANDES, L. C.; AZEVEDO, J. P. S.; MAGALHÃES, L. P. C. Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: NOBRE, C.; YOUNG, A. (Org.). **Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas: RM Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 2011. p. 123-144.

MOORE, T. L.; GULLIVER, J. S.; STACK, L.; SIMPSON, M. H. Stormwater management and climate change: vulnerability and capacity for adaptation in urban and suburban contexts. **Climatic Change**, v. 138, n. 3-4, p. 491–504, 2016.

MONTEIRO, M. (2010). **Preserva-se o Solo Natural para Drenagem das Águas nos Lotes Urbanos do Recife?** Avaliação de Pós-Ocupação em quadras dos bairros da Madalena e de Boa Viagem. Trabalho Final de Graduação. Recife, Universidade Federal de Pernambuco/Departamento de Arquitetura e Urbanismo.

MOURA, N. C. B.; PELLEGRINO, P. R. M.; MARTINS, J. R. S. Best management practices as an alternative for flood and urban storm water control in a changing climate. **Journal of Flood Risk Management**, v. 9, n. 3, p. 243-254, 2015.

MUNICH RE. **Percentage distribution by continent for flood / flash flood events worldwide 2013 – 2018**. Disponível em: <https://natcatservice.munichre.com/> Acesso em: 10 ago. 2019.

NDMAIS. **Não choveu, mas ruas ficaram alagadas em Joinville**. 2011. Disponível em: <https://ndmais.com.br/noticias/nao-choveu-mas-ruas-ficaram-alagadas-em-joinville/>. Acesso em: 01 ago. 2019.

NE10. **Canal da Av. Agamenon Magalhães transborda**. 2015. Disponível em: <https://noticias.ne10.uol.com.br/jc-transito//noticia/2015/06/25/canal-da-av-agamenon-magalhaes-transborda-553490.php>. Acesso em: 25 set. 2019.

NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, 2015, p. 1-34, 2015.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JR, M.; IRBER JR, L.; MARCONDES, G. G. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716-6732, 2013.

NOGUEIRA, F. F.; MARTINS, J. R. S.; LUCCI, R. M.; PEREIRA, M. C. S.; SILVA, F. P. **Avaliação de sistemas de macrodrenagem costeiros sob condições extremas combinadas de chuva e maré.** In: XII Encontro Nacional de Águas Urbanas, Maceió – AL, p. 1-8, 2018.

NUNES, D. M. **Gestão das Águas Pluviais Urbanas e Elementos da Infraestrutura Verde: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 166 p., 2017.

NUNES, A. A.; PINTO, E. J. A.; BAPTISTA, M. B. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, e9, 2018.

OLIVEIRA, T. H.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. Land cover classification and change analysis in Recife-PE municipality using unsupervised classification. **Revista GEAMA**, v. 2, n. 3, p. 352-367, 2016.

OLIVEIRA, T. H.; SILVA, J. E.; SANTOS, M. O.; OLIVEIRA, J. S. S.; GALVÍNCIO, J. D. Evolução espaço-temporal da drenagem superficial e do processo de impermeabilização em Santo Amaro, Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1571-1587, 2015.

OLIVEIRA, R. L. M. **Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da cidade de Recife - PE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017, 101 p.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [MARENGO, J. A., SCARANO, F. R. (Eds.)]. PBMC, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2016. 184 p.

PENEREIRO, J. C.; FERREIRA, D. H. L. Estatística apoiada pela tecnologia: uma proposta para identificar tendências climáticas. **Acta Scientiae**, v.13, n.1, p.87-105, 2011.

PERNAMBUCO. **Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. Barragem de Carpina passa por teste de funcionamento de comporta.** 2009. Disponível em: http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?view=article&catid=1%3Alatest-news&id=133%3Abarragem-de-carpina-passa-por-teste-de-funcionamento-de-comporta&format=pdf&option=com_content&Itemid=72. Acesso em: 15 de abr. 2019.

PERNAMBUCO. **Lei Nº 14.090, de 17 de junho de 2010.** Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco. Diário Oficial do Estado de Pernambuco, Recife, PE, 18 jun. 2010.

PERNAMBUCO. **Plano Estadual de Mudanças Climáticas.** Recife, 2011, 94 p.

PERNAMBUCO. Secretaria das Cidades. **Rios da Gente: Projeto executivo de dragagem de manutenção e recomposição das calhas naturais dos rios Capibaribe e Beberibe.** Recife, 2013, 76 p.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional**. 2016. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2018.

PESSOA, J. O.; LIMA, A. M. S.; RODRIGUES JUNIOR, J. C.; SANTOS, E. M.; PESSOA, J. O.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R. Aplicação do método análise de tendência inovadora (ITA) para detecção de tendências da precipitação anual e sazonal na Região Metropolitana do Recife. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 6, p. 2958-2977, 2023.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

PNUMA. United Nations Environment Programme (UNEP). **The Adaptation Finance Gap Report 2016**, Nairobi – Kenya, 2016, 73 p.

PREUSS, S. L. C.; SILVA, A. A.; BRAGA, R. A. P.; CABRAL, J. J. S. P. **Adequação estrutural e ambiental para a drenagem urbana sustentável: o caso do Recife, Pernambuco**. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, p. 1-19, 2011.

PRIORI JUNIOR, L. **Mudanças Climáticas e Possíveis Impactos nas Cidades Costeiras do Nordeste Brasileiro**. In: XV Encontro Nacional da Associação de Programas de Pós-graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, Recife, 2013, 17 p.

PROCEL-SANEAR. **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0: Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**. 1. ed. João Pessoa: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2012, 279 p.

RAMOS, M. A.; AZEVEDO, J. R. G. **Nova equação de chuvas intensas para a cidade de Recife - Pernambuco**. In: Anais do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza/Ceará, 2010.

RECIFE. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Índice de Risco à Mudança do Clima em Recife – PE**. Recife-PE, 2019, 165p.

_____. **Projeto Pegada de Cidades: Inventário de Emissão de Gases de Efeito Estufa (2012-2015) e Pegada Hídrica (2015) do Recife**. [Pref. do Recife, Servicios Ambientales S.A. (Eds.)]. Recife, 2017, 71 p.

_____. **Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)**. Recife, 2016. 98 p.

_____. **Lei Municipal nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015: Institui sobre a obrigatoriedade de instalação do telhado verde e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais em novas edificações no Recife**. Disponível em: <http://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280138>. Acesso em: 15 abr. 2019.

_____. **Lei Municipal nº 18.011, de 29 de abril de 2014: Dispõe sobre a Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife e dá outras providências**. Disponível em:

http://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/3._lei_no_18.011_2014.pdf. Acesso em: 15 abr. 2019.

_____. **Lei nº 16.176, de 09 de abril de 1996:** Estabelece a Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife. Disponível em: <http://www.legiscidade.recife.pe.gov.br/lei/16176/>. Acesso em: 15 mar. 2024.

REVI, A.; SATTERTHWAITTE, D. E.; ARAGÓN-DURAND, F.; CORFEE-MORLOT, J.; KIUNSI, R. B.; PELLING, M.; ... SOLECKI, W. **Urban areas**. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 535-612, 2014.

ROCHA, G. S.; FERNANDES, L. L.; SILVEIRA, R. N. P. O.; SILVA, M. N. A.; MESQUITA, D. A. **Análise de tendência da precipitação pluviométrica através de métodos estatísticos não paramétricos para o município de Monte do Carmo/TO**. In: *Anais do Congresso ABES FENASAN 2017*, São Paulo – SP, out. 2017.

ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M. Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. **J Health NPEPS**; v. 9, n. 1, e12603, 2024.

RODRIGUES, A. B.; CABRAL, J. J. S. P. **Capacidade adaptativa contra inundações urbanas: um estudo de caso em Recife, Pernambuco**. In: *Anais do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos*, Recife, 2024, p. 1-10.

RODRIGUES, M. S. C.; QUARESMA, C. C.; PEREIRA, R. K.; RIBEIRO, A. P. A utilização de Soluções Baseadas na Natureza no combate às Inundações Urbanas: tendências, atores e medidas adotadas. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.19, n. 3, p. 1-13, 2023.

ROSSMAN, L. A; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual: Volume I – Hydrology (Revised)**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2016.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2015.

SABOIA, M. A. M. **Estratégia robusta para a gestão de drenagem urbana em cenário de mudança do Clima**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016, 156 p.

SABOIA, M. A. M.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, e21, 2017.

- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.
- SANTOS, V. O.; NISHIYAMA, L. Tendências hidrológicas no alto curso da bacia hidrográfica do rio Uberaba, em Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, v. 17, n. 58, p. 196-212, 2016.
- SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n. 4, p. 176-185, 2014.
- SETO, K. C. Exploring the dynamics of migration to mega-delta cities in Asia and Africa: Contemporary drivers and future scenarios. **Global Environmental Change**, v. 21, n. 1, p. S94-S107, 2011.
- SILVA, A. C. **Modelagem hidrológica- hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018a, 103 p.
- SILVA, E. C. **Variabilidade espaço-temporal da pluviosidade da Região Metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2018b, 115 p.
- SILVA, P. O. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica do Rio Tejió por Ocasão de Chuvas Intensas Levando em Conta o Efeito de Marés**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2019, 231 p.
- SILVA, R. O. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 579-589, 2017.
- SILVA, S. R.; ARAUJO, G. R. S.. Algoritmo para determinação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1371-1383, 2013.
- SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, A. C.; SILVA, P. O.; SANTOS, R. M.; CABRAL, J. J. S. P. **O panorama da aplicação de medidas de controle na fonte em novas edificações do Recife-PE**. In: Anais do XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Brasília, 2022, p. 1-10.
- SILVA JUNIOR, M. A. B.; CABRAL, J. J. S. P.; FONSECA NETO, G. C.; SILVA, P. O.; GUERRA, C. M. F.; SILVA, S. R. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, p. 302-318, 2020.
- SILVA JUNIOR, M. A. B.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, J. J. S. P. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 37, p. 222-240, 2020.
- SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R.; CABRAL, J. J. S. P. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife-PE. **RBRH**, v. 22, e19, p. 1-12, 2017.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R. Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 2034-2053, 2016.

SILVA JUNIOR, M. A. B., SILVA, S. R. Drenagem Urbana: O dia em que o Recife parou. **Revista Construir Nordeste**, n. 71, p. 39-39, 2014.

SOUSA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; GIONGO, M. Qualidade estatística do clima presente simulado pelos modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para o estado do Tocantins. **Scientia Agraria (online)**, v. 19, p. 197-214, 2018.

SOUSA NETO, G. M. **Impactos do aumento do nível médio do mar em algumas capitais do nordeste brasileiro, e suas consequências ambientais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2009, 60 p.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Avaliação de tendências das temperaturas em Recife-PE: mudanças climáticas ou variabilidade? **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 3, p. 462-472, 2009.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 143-159, 2012.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250-268, 2012.

SUASSUNA, C. C. A.; FERREIRA, K. **Cidade Resiliente: Um Sistema de Indicadores dos Aspectos Institucionais**. In: Seminario Internacional sobre Ciências Sociales y Riesgos de Desastre: um encuentro inconcluso. Buenos Aires, 15 al 17 de septiembre; p. 1-16, 2015.

TAMM, O.; KOKKONEN, T.; WARSTA, L.; DUBOVIK, M.; KOIVUSALO, H. Modelling urban stormwater management changes using SWMM and convection-permitting climate simulations in cold areas. **Journal of Hydrology**, v. 622, p. 129656, 2023.

TOSTES, J. F. S.; MARTINS, M. A. Análise de precipitação e suas consequências no loteamento Jardim Vista Alegre, Guaratinguetá/SP e medidas de adaptação para minimizar impactos futuros. **Sustentare**, v. 2, n. 2, p. 78-96, 2018.

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, 2009, 13 p.

USACE. US Army Corps Engineers. **Hec- Ras River Analysis System - version 5.0: User's Manual**. 2016, 960 p.

UOL (2018). **Turistas andam em área alagada, na praça São Marco, em Veneza**. Disponível em: https://noticias.uol.com.br/album/101005vенеzaalagada_album.jhtm#fotoNav=1. Acessado em: 01 ago. 2019.

VAN LIEW, M. W.; VIETH, T. L.; BOSCH, D. D.; 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.

VASCONCELOS, R. F. A.; BEZERRA, O. G. (org.). **Atlas ambiental do Recife. Prefeitura da Cidade do Recife/ Secretaria de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente**. Recife, 2000.

VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. **The representative concentration pathways: an overview**. *Climatic Change*, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

YE, C. et al. Coupled effects of future rainfall and land use on urban stormwater drainage system in Tampa, Florida (USA). **Ecological Indicators**, v. 153, p. 110402, 2023.

WANDERLEY, H. S.; JUSTINO, F. B.; SEDIYAMA, G. C. Tendência da Temperatura e Precipitação na Península Antártica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 114-121, 2016.

WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B.; ANJOS, R. S.; ALMEIDA, C. A. P. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 14, v. 22, p. 149-164, 2018.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

WAYCARBON. **Índice de Risco à Mudança do Clima em Recife – PE** (Relatório Final: Objetivo 1). 2019, 165 p. (Versão cedida pela Prefeitura do Recife).

WIKIMEDIA (2016). **Inundação de maré alta no dia ensolarado em Brickell, Miami**.

Disponível

em:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:October_17_2016_sunny_day_tidal_flooding_at_Brickell_Bay_Drive_and_12_Street_downtown_Miami,_4.13_MLLW_high_tide_am.jpg.

Acessado em: 01 ago. 2019.

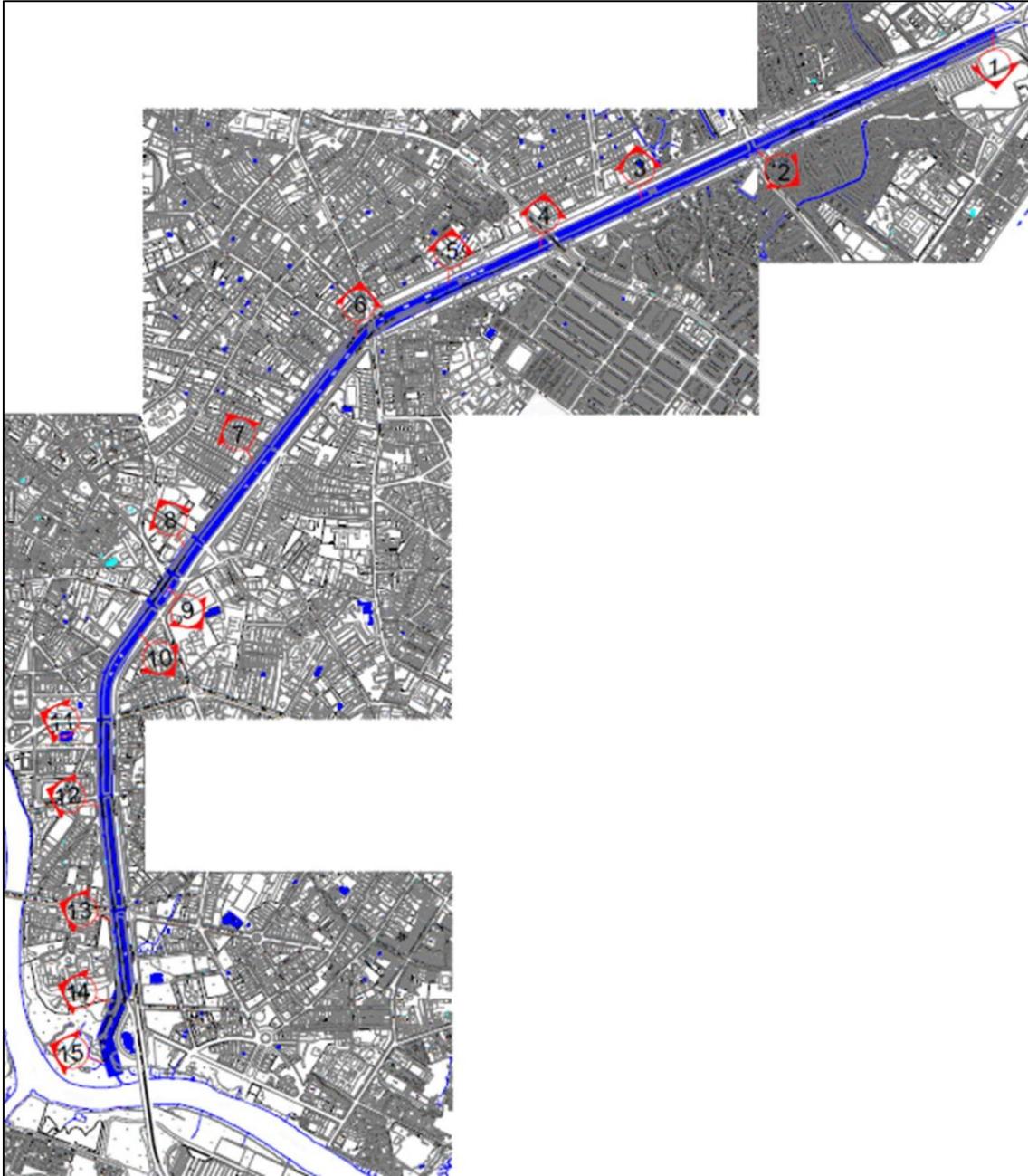
WU, X.; WANG, Z.; GUO, S.; LIAO, W.; ZENG, Z.; CHEN, X. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: A case study in Dongguan City, China. **Journal of Hydrology**, 547, p. 428-442, 2017.

WWF-BRASIL. **Guia de Adaptação às Mudanças do Clima para Entes Federativos**. 2017, 73p.

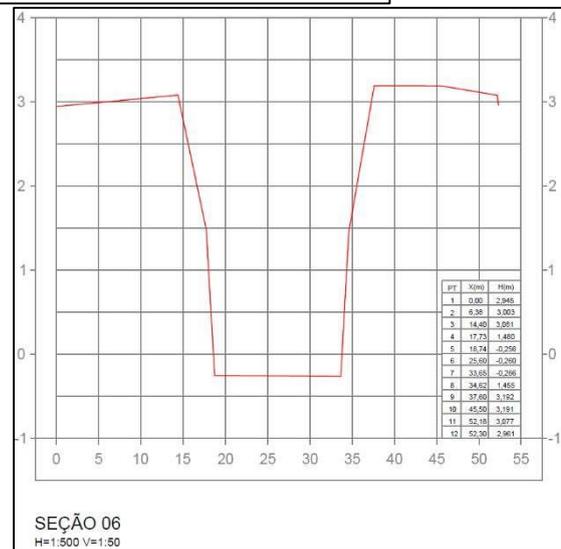
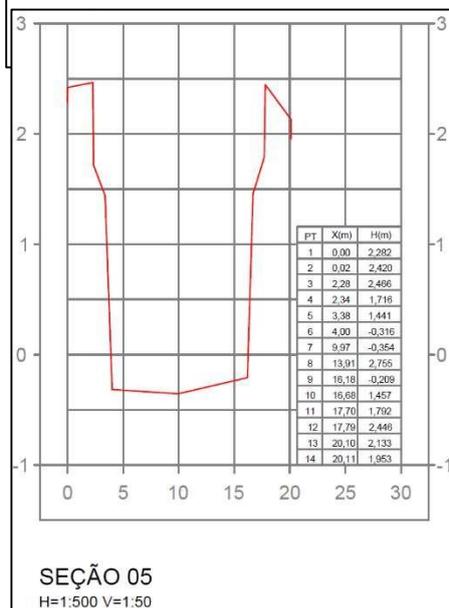
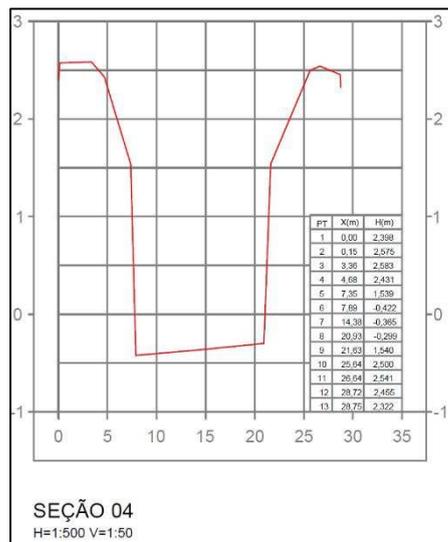
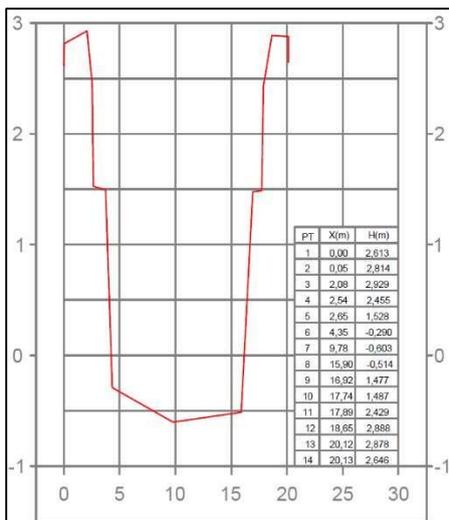
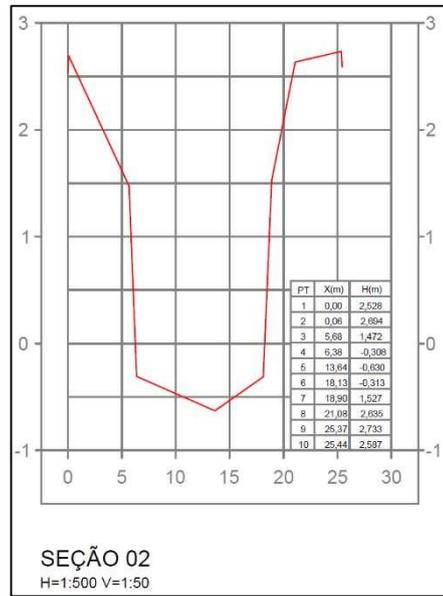
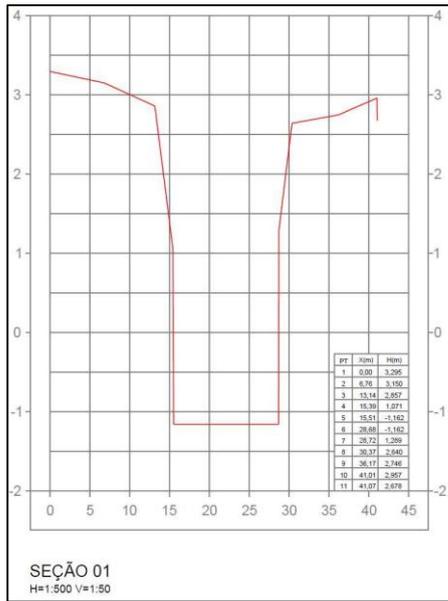
ZAMANI, M. G.; SANIEI, K.; NEMATOLLAHI, B.; ZAHMATKESH, Z.; POOR, M. M.; NIKOO, M. R. Developing Sustainable Strategies by LID Optimization in response to Annual Climate Change Impacts. **Journal Cleaner Production**, v. 416, n. 1, p. 137931, 2023.

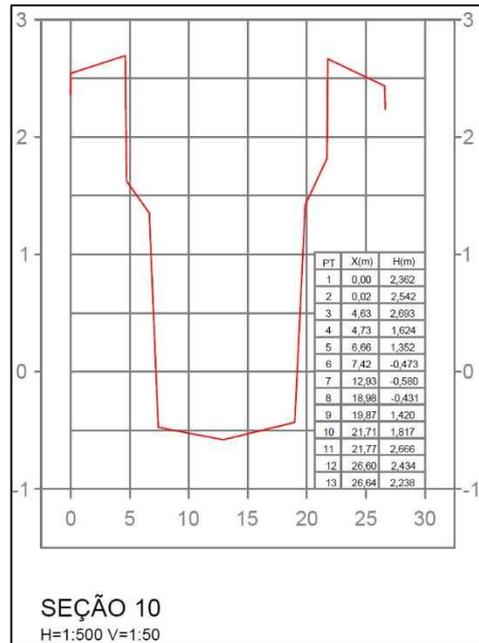
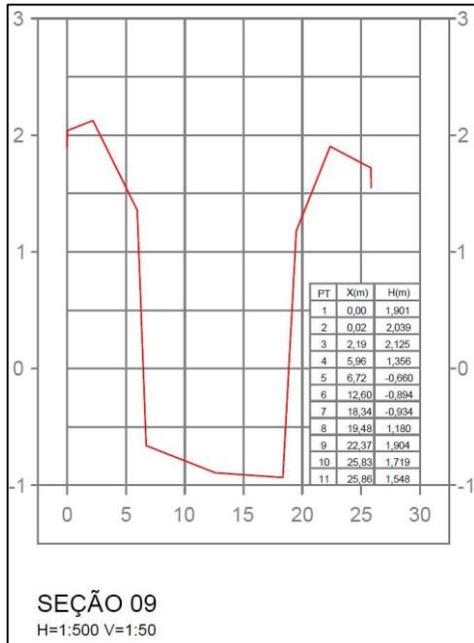
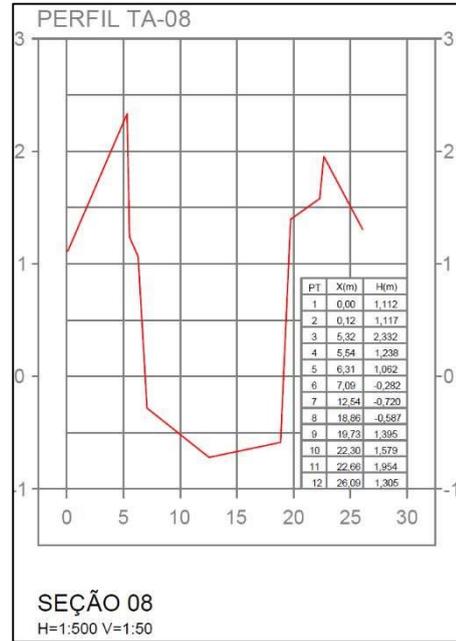
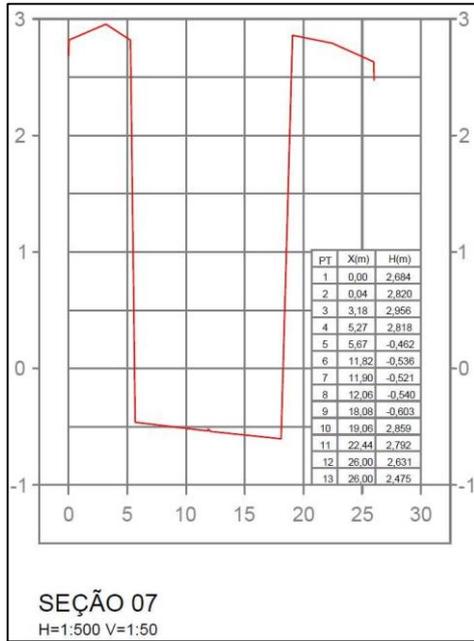
ZEVENBERGEN, C.; RIJKE, J.; HERK, S. V.; CHELLERI, L; BLOEMEN, P. J. T. M. Towards an adaptive, flood risk management strategy in The Netherlands: An overview of recent history. **River Flows**, p.1990-1996, 2016.

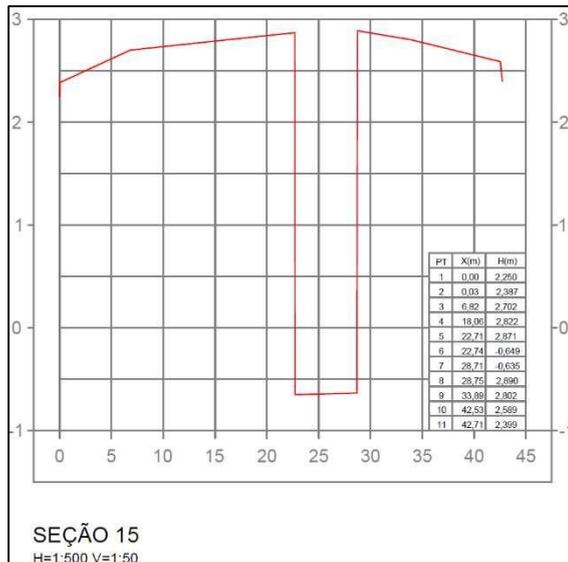
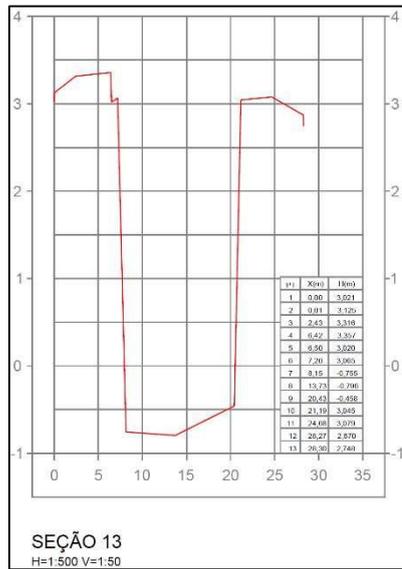
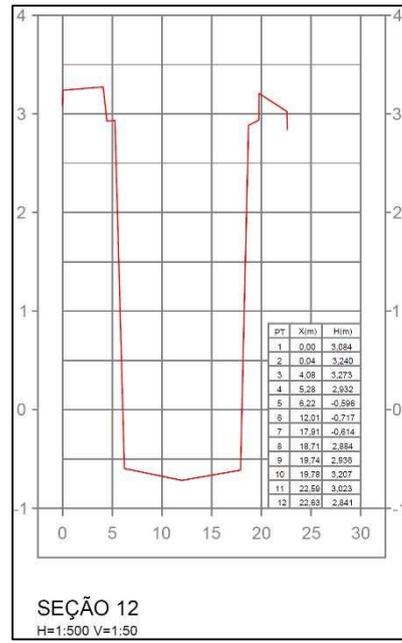
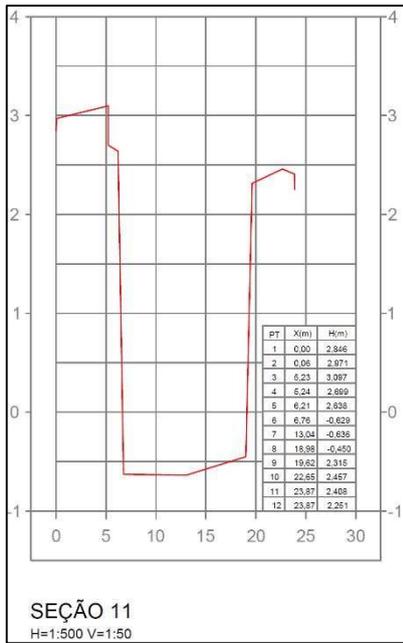
ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DA MACRODRENAGEM DA BACIA DO CANAL
DERBY-TACARUNA

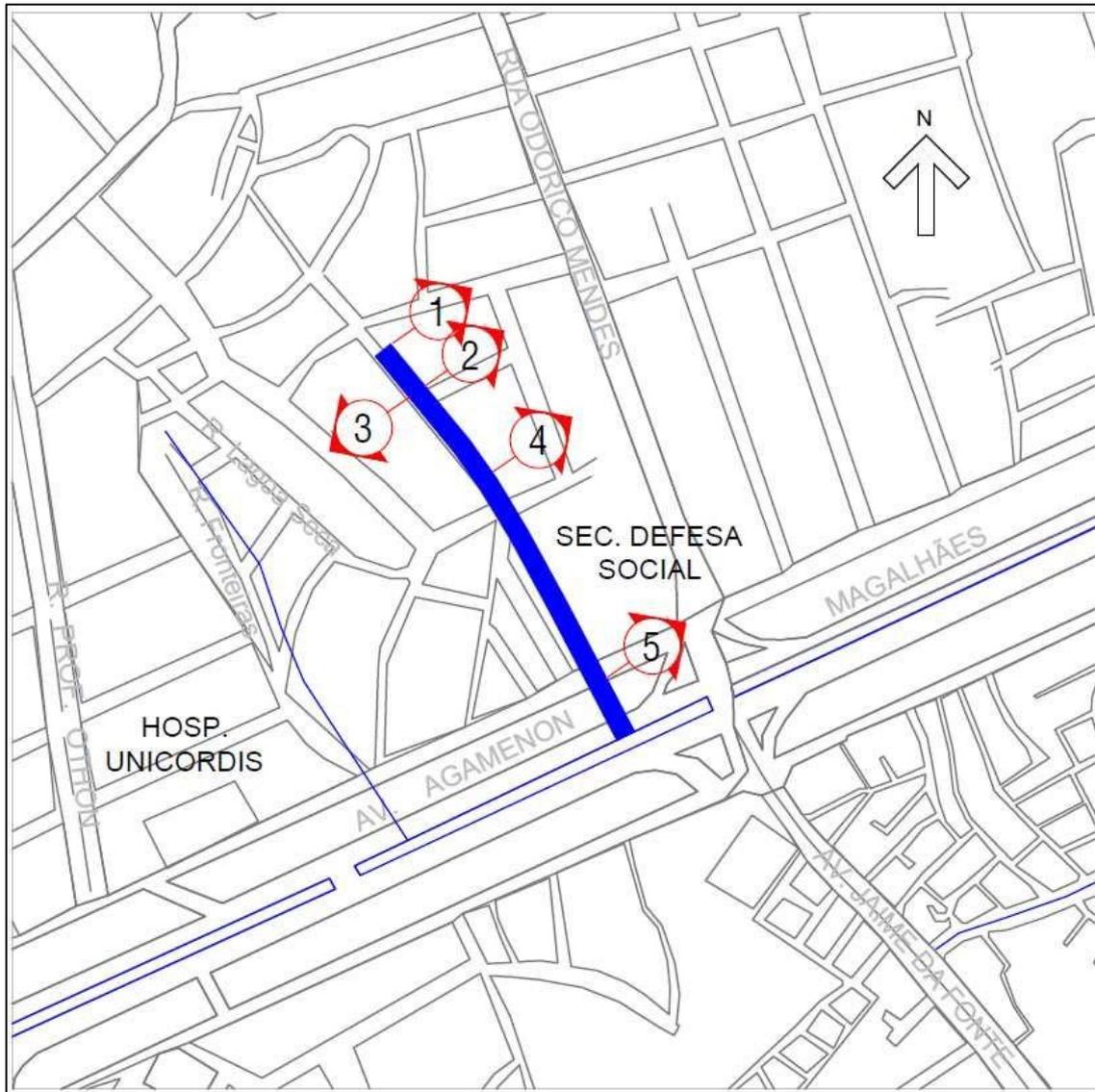


CANAL DERBY-TACARUNA

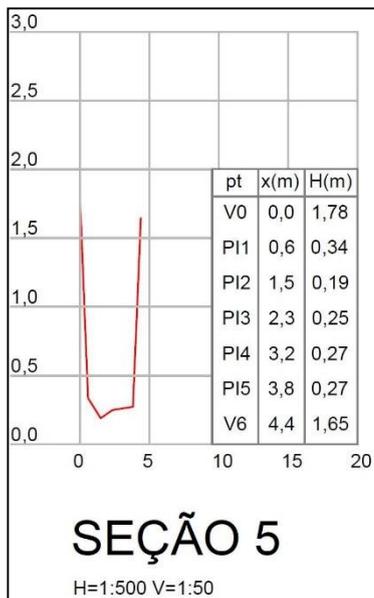
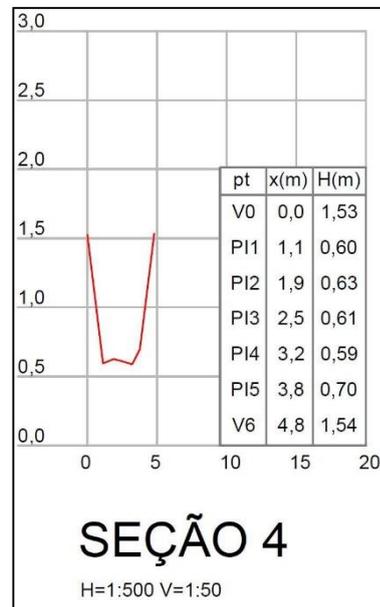
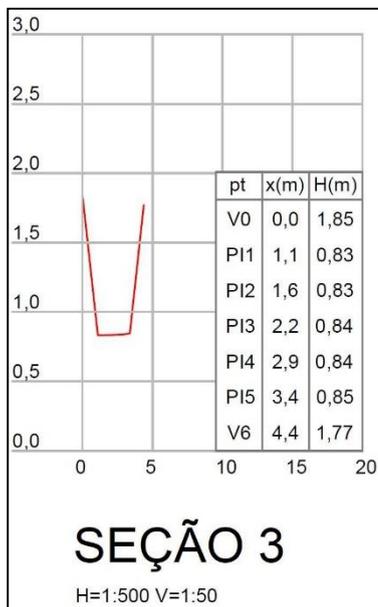
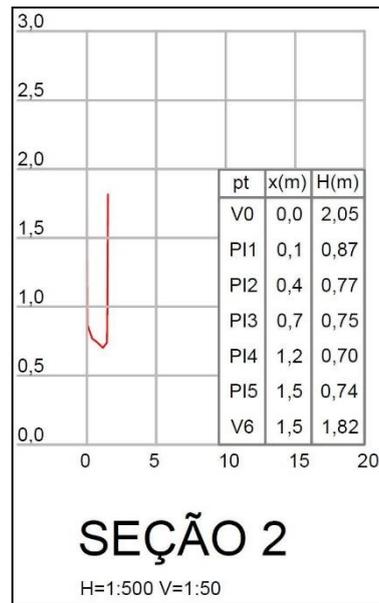
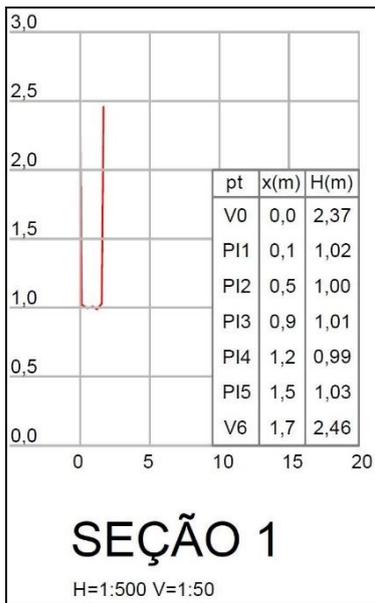


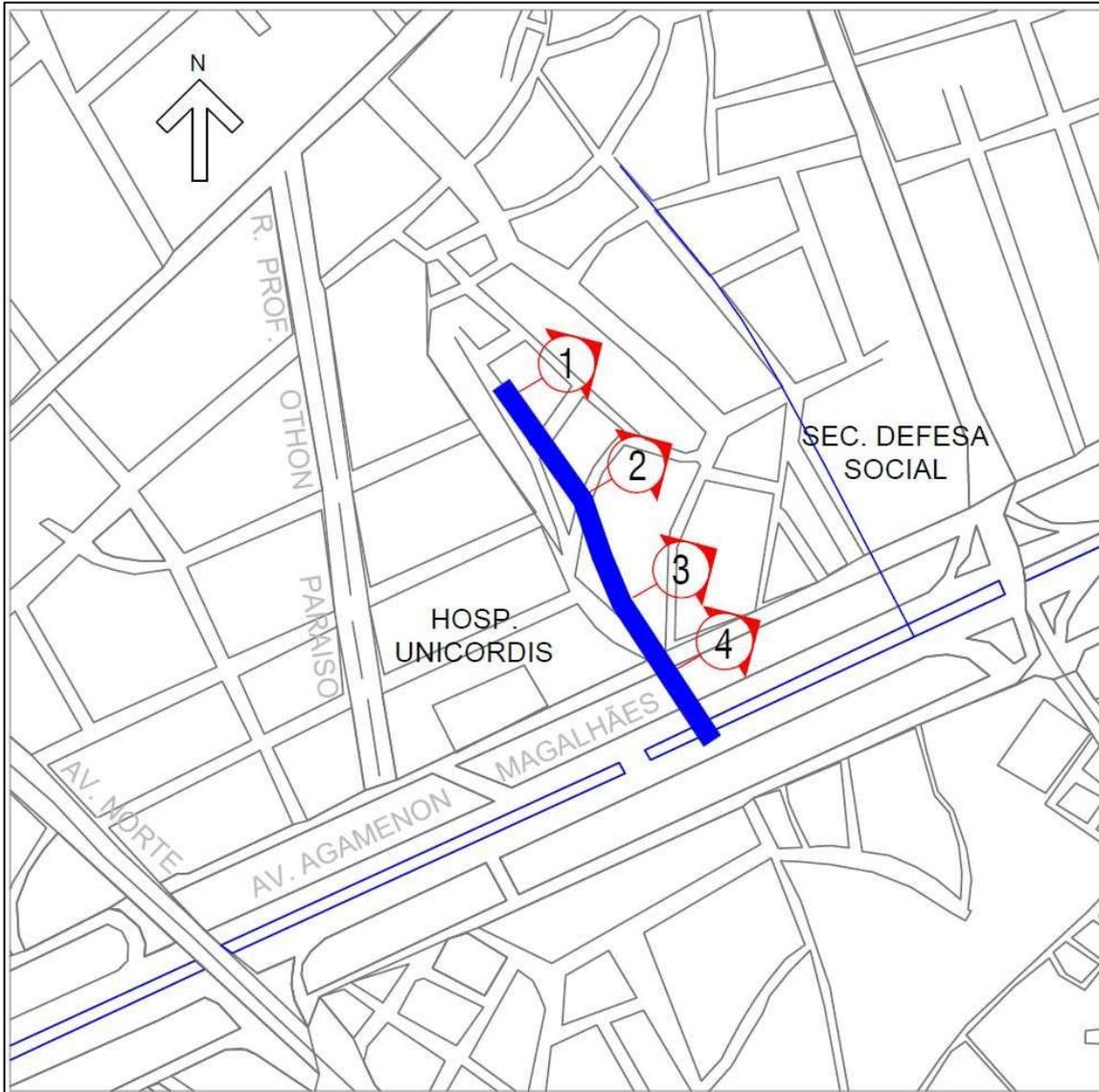




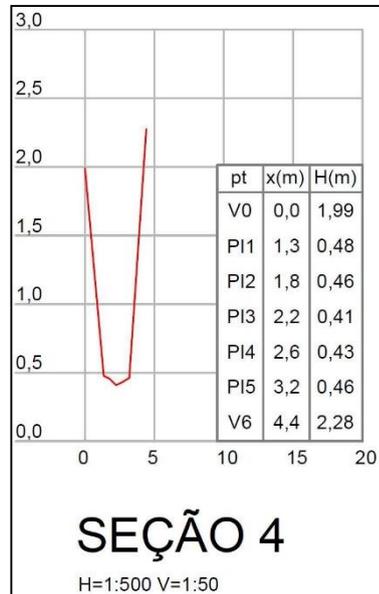
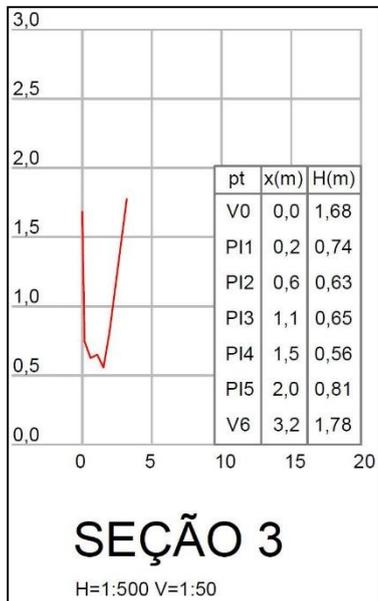
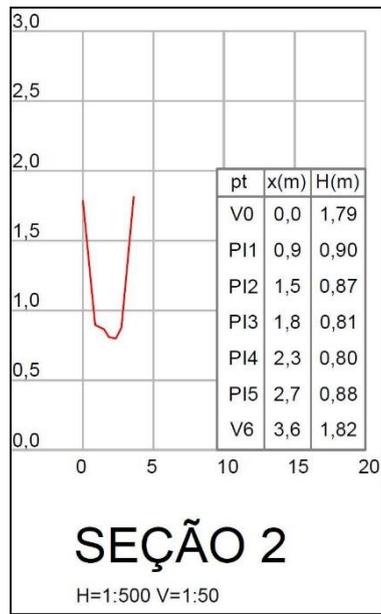
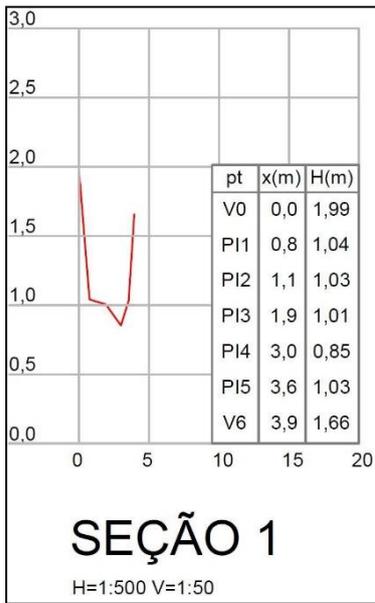


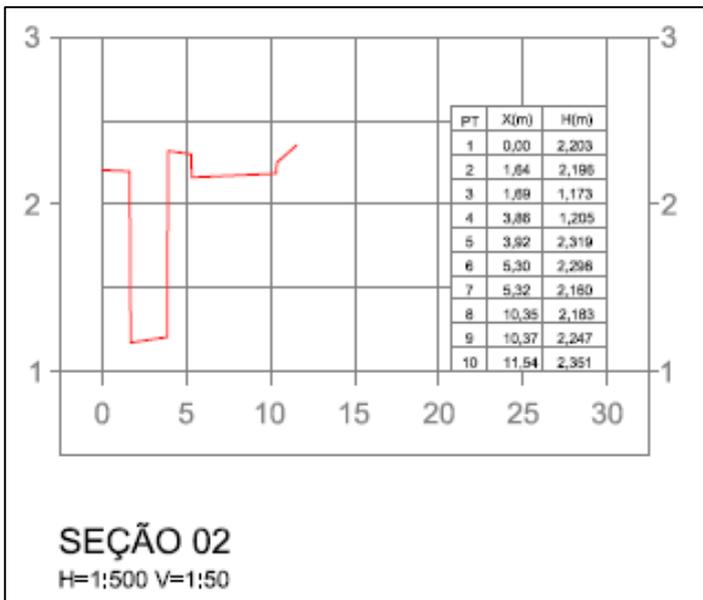
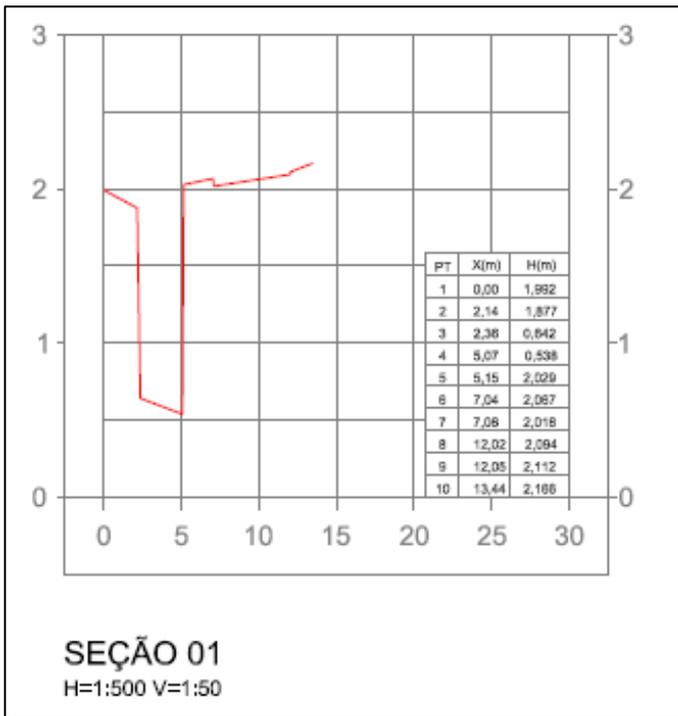
CANAL DA COHAB





CANAL DO TORREÃO





APÊNDICE A – REGISTROS DOS NÍVEIS D'ÁGUA NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

A planilha com os dados de monitoramento dos níveis d'águas podem ser consultadas através do QR code abaixo:

