



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318



Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE

Challenges for adapting the urban drainage infrastructure to the climate change scenario in Recife-PE

Marcos Antonio Barbosa da Silva Junior^a, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral^a, Gastão Cerquinha da Fonseca Neto^a, Pedro Oliveira da Silva^b, Carlos Maurício Fonseca Guerra^c, Simone Rosa da Silva^d

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências-CTG. Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-550. E-mail: marcos15barbosa@hotmail.com, jcabral@ufpe.br, gastaocerquinha@gmail.com.

^b Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana-EMLURB. Av. Gov. Carlos de Lima Cavalcanti, n. 9, Derby, Recife-PE, Brasil. CEP: 50070-110. E-mail: poliveira@recife.pe.gov.br.

^c Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade-SEMAS/PE. Av. Conselheiro Rosa e Silva, n. 1339, Jaqueira, Recife-PE, Brasil. CEP: 52050-020. E-mail: mauricio.guerra@recife.pe.gov.br.

^d Universidade de Pernambuco-UPE, Escola Politécnica de Pernambuco-POLI. Rua Benfica, n. 455, Madalena, Recife-PE, Brasil. CEP: 50.720-001. E-mail: simonerosa@poli.br.

ARTICLE INFO

Recebido 12 Dez 2019

Aceito 18 Ago 2020

Publicado 28 Ago 2020

ABSTRACT

The effects of changing climate can cause significant impacts on the drainage system of urban centers. This situation gets even worse in urban coastal plains, such as the city of Recife-PE, which has disorderly urbanization, high rainfall, and a drainage system that is very vulnerable to the daily tidal variability. In this context, this study discusses the challenges of adapting the city's urban drainage infrastructure to face climate change. The literature review was carried out and resulted in prompt diagnosis focusing: the problems and peculiarities of local drainage; the effects of climate change on the city's drainage system, emphasizing current and future vulnerabilities; and initiatives to mitigate impacts and adapt infrastructure.

Keywords: Intense rainfall, tides, vulnerabilities.

RESUMO

Os efeitos do clima em mudança podem provocar impactos significativos no sistema de drenagem dos centros urbanos. Tal situação fica ainda mais agravada nas planícies urbanas costeiras, como a cidade do Recife-PE, que tem urbanização desordenada, pluviosidade elevada e um sistema de drenagem bastante vulnerável à variabilidade diária das marés. Nesse contexto, este estudo discute os desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana da cidade, visando o enfrentamento às mudanças do clima. Para isso, realizou-se uma revisão de literatura que resultou no diagnóstico expedito focando: as problemáticas e peculiaridades da drenagem local; os efeitos da mudança do clima no sistema de drenagem da cidade, destacando as vulnerabilidades atuais e futuras; e as iniciativas para a mitigação dos impactos e a adaptação da infraestrutura.

Palavras-Chave: Chuvas intensas, marés, vulnerabilidades.

Introdução

Nas últimas décadas, muitos municípios brasileiros se consolidaram por um processo de urbanização acelerado e, quase sempre, não planejado. Este processo conduz à redução da capacidade de infiltração da água no solo e ao aumento do escoamento superficial das águas

pluviais, podendo provocar sérios problemas de alagamentos urbanos e/ou inundações. Associado a isso, outro fator que tem gerado preocupação nas metrópoles brasileiras, relaciona-se aos efeitos das mudanças climáticas globais.

Conforme o Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da

Organização das Nações Unidas (ONU), publicado em 2014, em cenário mundial, os riscos climáticos baseados em precipitações extremas e inundações costeiras a partir da elevação do nível médio do mar (NMM), são de moderado a alto, apresentando um alto índice de confiança na incerteza das previsões. Tais eventos, que se mostram problemáticos nas grandes cidades por conta da impermeabilização excessiva do solo e de técnicas de drenagem pouco eficazes, poderão ser agravados com um cenário de ciclos hidrológicos alterados. Assim, discussões sobre os possíveis efeitos das alterações climáticas nos sistemas de drenagem urbana poderão auxiliar na preparação/adaptação das grandes cidades para o enfrentamento dos desafios climáticos futuros (Miguez et al., 2011; IPCC, 2014).

Geralmente, os alagamentos urbanos estão associados às falhas na infraestrutura de drenagem, seja por subdimensionamento do sistema, ausência de manutenção ou aumento da impermeabilização do solo. Com o clima em mudança, tais falhas podem ser relacionadas ao agravamento dos eventos de chuva intensa e à restrição da maré na saída do sistema. Na possível combinação de tais variáveis climáticas (chuva e maré), considerando os eventos hidrológicos para o futuro, os efeitos serão refletidos na abrangência dos alagamentos, fazendo-os chegar a locais antes não alagáveis, aumentando as cotas de lâmina d'água e os tempos de permanência (Miguez et al., 2011; Silva Junior & Silva, 2016).

Essa situação é mais agravada nas planícies urbanas costeiras, como o caso do Recife-PE, que teve seu processo de urbanização desordenado e possui uma rede de drenagem bastante vulnerável às oscilações diárias das marés, podendo provocar problemas de alagamentos na ocorrência de chuvas intensas combinadas com maré alta (Silva Junior & Silva, 2016; Silva Junior et al., 2017). Para a região do litoral do Brasil espera-se um aumento de 0,5 a 0,7 metros no NMM, até o ano de 2100, projeção baseada em séries históricas de 1986 a 2005 (IPCC, 2014).

De acordo com o PBMC (2016), o Recife ocupa o 16º lugar no ranking de “cidades do mundo mais vulneráveis às mudanças do clima”. Para Recife (2017) tal fato é atribuído às características físicas e sociais, à alta densidade populacional litorânea, à alta impermeabilização do solo e à baixa altimetria. Dito isto, a cidade começa a apresentar efeitos oriundos do aumento do NMM, das precipitações e da sua temperatura média. Como consequência da elevação do NMM até 2100, prevê-se que a capital pernambucana poderá perder 33,7 km² de sua área (PBMC, 2016; Recife, 2017; Costa et al., 2010).

As evidências acerca dos riscos climáticos reforçam a importância do engajamento dos atores da sociedade para a mitigação dos impactos e a necessidade de adaptação. Para o IPCC (2007), o termo *adaptação* é definido como um ajuste nos sistemas naturais e/ou humanos em resposta a uma determinada situação, com a finalidade de atenuar danos. A adaptação 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). O termo *capacidade de adaptação* ou *capacidade adaptativa* é definido pelo IPCC (2014) como o potencial das instituições e organizações em tratar, gerenciar e superar as condições adversas em um curto espaço de tempo, usando os recursos disponíveis na ocorrência de um dado evento climático.

Para isto, faz-se necessário traçar *estratégias de adaptação* que visam atenuar, erradicar danos ou explorar oportunidades para uma situação real ou esperada durante um evento climático.

Georgeson et al. (2016) 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. No Brasil, as medidas de adaptação adotadas, em geral, são físicas, como a construção de diques, barragens de contenção de cheias, elevação no nível dos aterros e obras de drenagem (Marengo et al., 2017).

Diante do exposto, este estudo discute os desafios para adaptar a infraestrutura de drenagem urbana do Recife, a partir do clima em mudança.

Material e Métodos

Este estudo enquadra-se como exploratório e descritivo, quanto aos fins, e como pesquisa bibliográfica, baseada em uma revisão de literatura, quanto aos meios (Marconi & Lakatos, 2010). Assim, foram levantados estudos de caso (a partir de teses, dissertações e artigos científicos), planos e legislações feitos para Pernambuco, focando o Recife, que versavam, prioritariamente, sobre a vulnerabilidade da drenagem local com a mudança do clima (considerando o aumento do nível do mar e das intensidades das chuvas) e possibilidades de adaptação da infraestrutura.

Também foram consideradas as bases de dados climáticos do: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para chuvas diárias (1961-2017) e horárias (2004-2019) no Recife; e DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) para as previsões de marés no Porto do Recife.

A partir disso, foi realizado um diagnóstico expedito ressaltando as principais problemáticas e peculiaridades da drenagem local; os efeitos das alterações climáticas no sistema de drenagem da cidade; e as iniciativas para mitigação dos impactos e adaptação da infraestrutura de drenagem urbana.

Resultados e Discussão

Recife e o sistema de drenagem: problemáticas e peculiaridades

O Recife é uma cidade estuarina e costeira, situada na Região Nordeste do Brasil, fortemente urbanizada e que sofre com alagamentos causados pelas chuvas. Apresenta área territorial de 218,85 km² e população estimada, para o ano de 2019, de 1.645.727 hab. É caracterizada com alta densidade populacional do litoral, percentual elevado de impermeabilização do solo e baixas altitudes da

região costeira, com variação de 2 a 4 m. Tem clima predominantemente quente, com média de 25°C de temperatura, precipitação anual média em torno de 2.500 mm (com período chuvoso entre março e agosto) e umidade relativa anual média de 80% (Pernambuco, 2011a; Recife, 2017; IBGE, 2019).

O município conta com a macrodrenagem natural de um conjunto de bacias hidrográficas denominado “Estuário Comum do Recife”, que é constituído pelas desembocaduras do Capibaribe, Beberibe e Tejiú (Figura 1). Estas áreas de planície urbana costeira são de alta vulnerabilidade à inundação diante da elevação do nível do mar. Além disso, Luna et al. (2017) identificaram subsidência do solo de 0,68 mm ano⁻¹, provocada por exploração da água subterrânea.

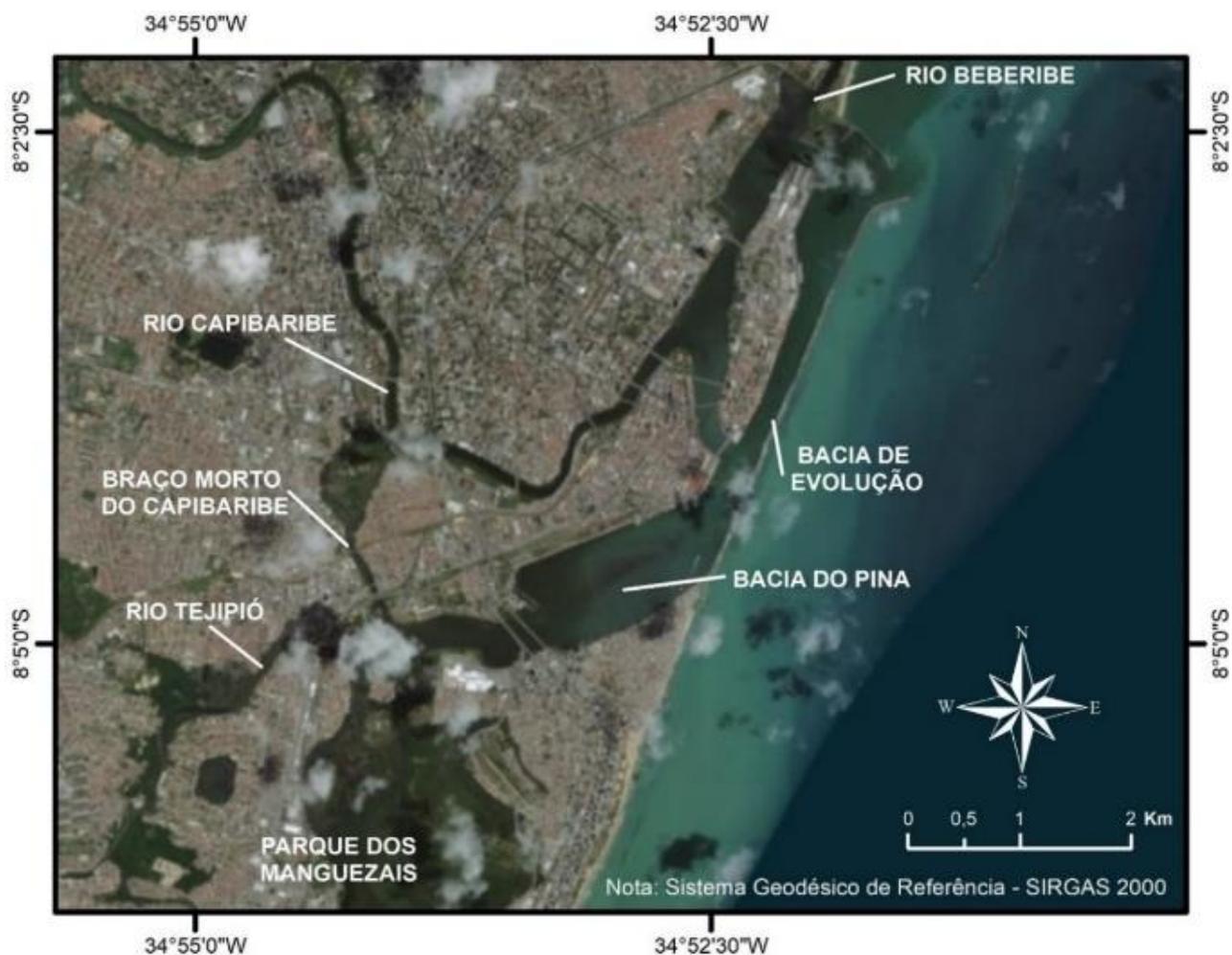


Figura 1. Estuário Comum do Recife (macrodrenagem). Fonte: Adaptado de Silva Junior & Silva (2016).

Preuss et al. (2011) afirmam que o Recife possui características naturais e condições geográficas que dificultam a drenagem na cidade, tais como: áreas planas, baixas cotas em relação ao nível do mar, lençol freático aflorante na estação chuvosa e influência das marés na rede de drenagem. Além disso, existem fatores antrópicos

que atrapalham a eficiência da drenagem local, devido à: canalização de riachos urbanos e ocupações de suas margens, alta taxa de impermeabilização do solo, deposição inadequada de resíduos sólidos nos elementos de drenagem e ausência de saneamento básico (Cabral & Alencar, 2005).

Além do sistema de drenagem natural, a macrodrenagem do município é composta por 99 canais (a maior parte deles são riachos naturais que receberam revestimento nos taludes), totalizando 133 km de extensão (média de 0,60 km de canal por km²). Cerca de 63% da extensão total da rede de canais possuem revestimento. A microdrenagem, composta por galerias e canaletas, possui extensão aproximada de 1.560 km (Emlurb, 2016).

Em 2016, o Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas da Cidade do Recife - PDDR (Emlurb, 2016) mapeou 159 pontos de alagamentos (a maioria situado 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 em um aporte de R\$ 125,6 milhões.

O Recife foi palco de diversos eventos de cheias do rio Capibaribe, com o mais expressivo ocorrido em 1975. Após a construção das barragens de contenção no baixo Capibaribe para controle de enchentes, em especial a barragem de Carpina (inaugurada em 1978), os transtornos das chuvas se reportam, atualmente, a alagamentos pontuais em vias urbanas, causados pela ineficiência da rede de microdrenagem. No entanto, bacias menores como as dos rios Tejipió e Beberibe, anualmente têm sido alvo de eventos extremos nos períodos chuvosos, com danos materiais aos ribeirinhos.

Mesmo com os atenuantes na bacia do rio Capibaribe, Fonseca Neto (2018) relata que no ano de 2011, as populações ribeirinhas sofreram com inundações devido à abertura das duas comportas

da barragem de Carpina, que juntas podem liberar cerca de 400 m³ s⁻¹ (Pernambuco, 2011b). Fonseca Neto (2018) conta que, na ocasião, o reservatório estava próximo da sua capacidade máxima e havia a previsão de mais chuvas na região. Em 2009, as comportas receberam reparos e foram abertas para teste. Segundo Pernambuco (2009), nesta ocasião, houve aviso prévio às populações que viviam às margens do rio Capibaribe, a fim de reduzir os transtornos provocados pelo aumento da vazão no rio.

Vulnerabilidades: cenários climáticos atuais e previstos

Marés

Nas últimas décadas, o Recife vem sendo afetado pelos impactos provocados com a mudança do clima. De acordo com Harari et al. (2008 *apud* P BMC, 2016), o nível do mar, na costa pernambucana, aumentou 5,6 mm ano⁻¹ 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, feitas pela DHN, 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 da ordem de 2,5 m.

Hoje, as amplitudes de maré chegam a 2,8 m e nessa condição, sem chuvas, algumas áreas da cidade apresentam alagamentos: nos bairros de Santo Amaro (Rua Dr. Silva Ferreira, Rua da Aurora (Figura 2a), Rua Capitão Lima (Figura 2b), 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).

Em Santo Amaro, Oliveira et al. (2015) afirmam que algumas áreas do bairro foram criadas a partir de sucessivos aterros de locais inundáveis no século 17 e que, hoje, tais localidades possuem pontos de alagamentos.



Figura 2. Alagamentos provocados, em 07/04/2016, por maré de 2,7 m. a) Rua da Aurora b) Rua Capitão Lima. Fonte: G1PE (2016).

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 o ano de 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). 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 produzirá 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, Costa et al. (2010) chamam a atenção para o Recife Antigo, que é um importante centro econômico-administrativo da cidade e possui grande valor histórico e cultural.

Não diminuindo a criticidade apontada por Costa et al. (2010), mas é válido ressaltar que as cotas consideradas no estudo, 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 Regueira), 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 de acordo com Sousa Neto (2009), 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 Aeroclub, no bairro do Pina. Ainda no bairro do Pina, as águas da bacia do Pina poderão atingir a Av. Engenheiro Antônio de Góes e ruas adjacentes, podendo chegar ao bairro de Brasília Teimosa. 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, à 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 causaria alagamentos nas áreas ribeirinhas e impediria as saídas da microdrenagem no riacho, na ação 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 pela variabilidade diária das marés, concordando com Alcoforado (2006) que apontou influência das marés em toda a macrodrenagem na região de planície do Recife, considerando marés de 2,5 m (na tábua do Porto do Recife). Ainda de acordo com Silva (2019), quando avaliada a vulnerabilidade do rio Tejipió frente aos cenários climáticos futuros, foi constatado que os eventos de chuvas intensas combinados com maré alta (para o aumento do NMM de 82 cm) poderia inundar cerca de 17,54% da região de planície de sua bacia.

Em territórios costeiros e de baixas cotas, o comportamento do nível do mar em relação à drenagem urbana é fator determinante para a eficiência do seu desempenho, na ocorrência dos eventos extremos de precipitação. Isso porque, com a maré alta, a diferença de altitude entre a área a ser drenada e o ponto de deságue será reduzido, deixando o sistema lento, principalmente, quando a drenagem for por gravidade. Tal fato reduzirá a vida útil do sistema de drenagem e o deixará mais vulnerável a possuir falhas estruturais, hidráulicas e ambientais (Silva Junior & Silva, 2014, 2016).

Chuvas intensas

Sabe-se que, para dimensionamento de um sistema de drenagem urbana, a chuva de projeto é um dos fatores mais importante. Normalmente ela é obtida pela equação IDF (intensidade, duração e frequência) da região e está associada a um período de retorno predefinido.

No Recife, em meados da década de 80, foi elaborada a equação IDF da Região Metropolitana do Recife (RMR), no âmbito do Plano Diretor de Macrodrenagem da RMR desenvolvido pela Fidem (1985). Na elaboração da equação, foram utilizados os pluviogramas do INMET, abrangendo 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 parte da

rede de drenagem urbana do Recife foi dimensionada 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 para a cidade, considerando as máximas precipitações anuais em três postos pluviométricos (Recife-Curado, Recife-Várzea e Recife-Caxangá), gerando uma série histórica de 85 anos (1927-2011).

Silva Junior & Silva (2016) compararam as intensidades de chuva calculadas pelas equações IDF da Fidem (1985) e da Emlurb (2016). Os autores verificaram 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, para os períodos de retorno (TRs) de 2, 5, 10 e 25 anos. Para os autores, tais diferenças nas intensidades de chuva podem estar associadas, provavelmente, ao período da série de dados utilizados e à possíveis alterações no regime de chuvas (Ramos & Azevedo, 2010), ambos influenciados pelo efeito das mudanças do clima. Por isso, é recomendada a atualização das equações de chuvas, a fim de evitar os subdimensionamentos de obras hidráulicas.

Alguns estudos sobre chuvas extremas no meio urbano consideram que precipitações, a partir de 30 mm em 24 h, podem provocar impactos na rotina de um município (Souza et al., 2012; PBMC, 2016; Fonseca, 2017; Wanderley et al., 2018; Nunes et al., 2018).

Neste sentido, a Figura 3 mostra a frequência absoluta destes eventos, por mês, no Posto Recife - Curado (INMET), entre os anos de 1961 e 2017, classificados nos seguintes intervalos de totais precipitados no dia: acima de 100 mm, entre 50 e 100 mm e entre 30 e 50 mm.

Analisando a frequência desses eventos em Recife, assim como notado por Silva Junior et al. (2020), foram encontrados 1140 registros entre 1961 e 2017, com uma média de 20 ocorrências por ano.

A Figura 3 mostra que a maior ocorrência de chuvas iguais ou superiores a 30 mm está entre os meses de junho e julho, com 227 e 201 eventos registrados, respectivamente. Os meses de outubro a dezembro são aqueles com menores registros de chuvas diárias fortes ($30 \leq X < 50$ mm), muito fortes ($50 \leq X < 100$ mm) ou extremamente fortes ($X \geq 100$ mm).

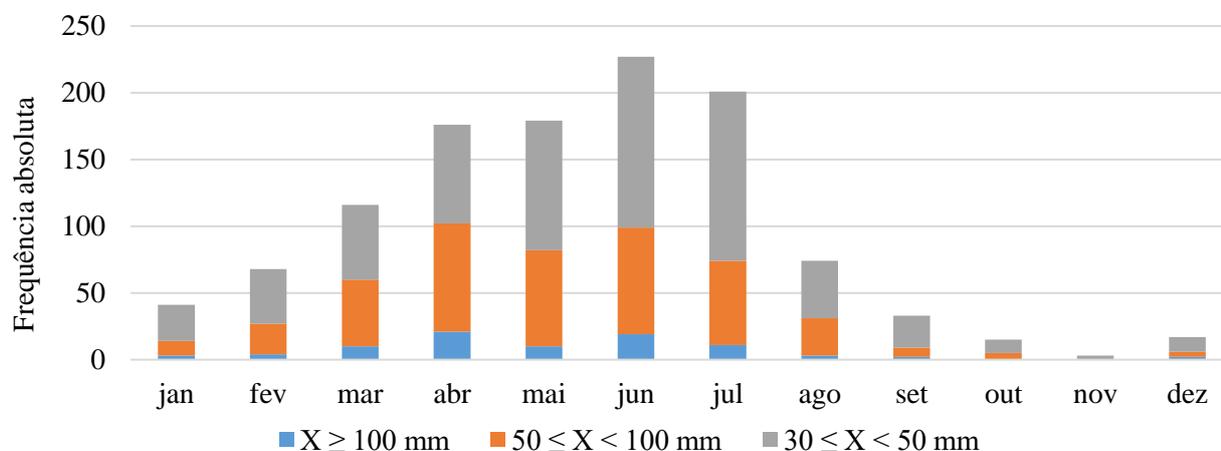


Figura 3. Frequências mensais absolutas dos eventos extremos de chuvas ocorridos entre os anos de 1961 e 2017 no Recife/PE, por faixa de precipitação. Fonte: Baseado nos dados do INMET e organizado por Silva Junior et al. (2020).

Estudos realizados por Souza & Azevedo (2012), Silva et al. (2017), Wanderley et al. (2018) e Silva Junior et al. (2020) indicam 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 otimista (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. Segundo Recife (2019), as chuvas intensas e os indicadores de maior precipitação em um dia e acumulada em cinco dias mostram tendências de aumento. Tais evidências, de chuvas mais intensas e concentradas em um curto período, ligam o sinal de alerta para um município que possui um sistema de drenagem pouco eficiente e bastante vulnerável às variações das marés.

Wanderley et al. (2018) afirmam, a partir de uma análise da série histórica (1961-2016) do posto Recife - Curado (INMET), que 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 os anos de 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 (Recife - Curado), a Tabela 1 mostra os valores máximos anuais de chuvas diárias.

A Figura 4 mostra a curva de distribuição Log-Normal gerada pelos valores de precipitação máxima diária anual da Tabela 1 e a frequência de excedência a partir da fórmula de Weibull. Segundo a Emlurb (2016), tal lei de distribuição de probabilidade, Log-Normal, geralmente se aplica muito bem a valores extremos.

Tabela 1. Máximas precipitações diárias anuais no Recife – Estação Recife (Curado) (1961 – 2017). Fonte: Baseado nos dados do INMET e organizado por Silva Junior et al. (2020).

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).

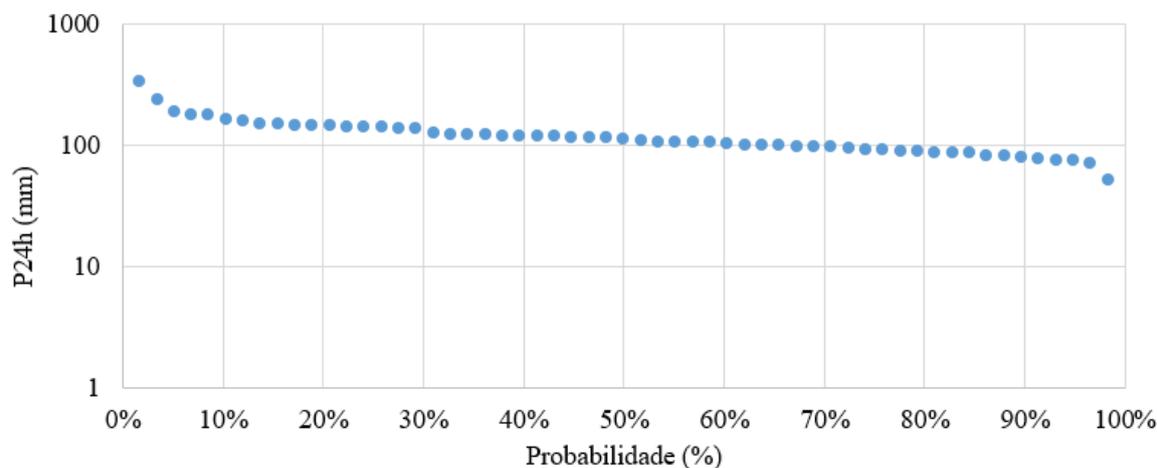


Figura 4. Distribuição teórica (Log-Normal) das máximas chuvas diárias anuais no período de anos de 1961 a 2017 (Recife - Curado). Fonte: Baseado nos dados do INMET e organizado por Silva Junior et al. (2020).

A Tabela 1 destaca as dez maiores chuvas diárias ocorridas no Recife entre os anos de 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, o terceiro maior evento registrado (185,9 mm). Outra observação importante é que tais eventos se concentraram, em sua maioria, no período chuvoso (entre os meses de março e julho), com exceção dos dois citados eventos ocorridos no mês de agosto.

A Figura 4 mostra a probabilidade de ocorrência de eventos diários de precipitação e 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%, por ano, e um com volume de 165,3 mm possui chance de 10%, por ano,

corroborando os resultados de Wanderley et al. (2018) e Emlurb (2016).

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. Na Tabela 2 são apresentados os totais diários de chuva para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos obtidos neste estudo e comparados com outras referências (Silva & Araújo, 2013; Emlurb, 2016; Wanderley et al., 2018). A partir da série do Posto Curado (1961-2017), utilizada neste estudo, as chuvas na ordem de 150 mm dia⁻¹ equivalem ao TR de 5 anos, corroborando os valores de Silva & Araújo (2013) e Wanderley et al. (2018) – 149 mm dia⁻¹ e 152 mm dia⁻¹, respectivamente. Percebe-se que os valores encontrados pela Emlurb (2016) são maiores que os obtidos neste estudo e nas demais referências. Esse fato está atribuído ao tamanho da série histórica da Emlurb (2016) ser mais extensa, com 85 anos de registros.

Tabela 2. Tempo de retorno dos eventos de precipitação máxima diária/ano para a cidade do Recife. Fonte: Silva Junior et al. (2020).

TR	Precipitação em 24 h (mm)			
	Valores obtidos	Silva & Araújo (2013) ¹	Emlurb (2016) ²	Wanderley et al. (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).

Chuvas intensas e o efeito das marés

Como dito anteriormente, o município do Recife sofre nos períodos chuvosos não só pela urbanização desordenada, mas também por ter características geográficas de uma cidade litorânea, que dificulta ainda mais a eficiência na drenagem quando há a combinação entre chuvas intensas e maré. Para a análise desta combinação, foram selecionados os eventos de precipitação mais relevantes (acima de 100 mm) e ocorridos nos últimos cinco anos. Os registros horários de precipitação foram extraídos 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 nos dias 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 de tais eventos se refletiram, principalmente, na mobilidade urbana, com alagamentos de eixos

viários importantes da cidade, além de provocar deslizamentos em áreas de morro, causando mortes e desabrigados, tendo ampla divulgação da mídia.

A partir de uma relação direta entre o total precipitado no dia de cada evento (Tabela 3) com as recorrências equivalentes (Tabela 2), é possível afirmar que os TRs para os eventos chuvosos nos dias: 17/05/2013 (146 mm) foi de cinco anos, corroborando Silva Junior & Silva (2014); 13/06/2019 (169,2 mm) esteve entre cinco e 10 anos; e os demais eventos em torno de dois anos, concordando com as análises das chuvas de 26/06/2016 (106,8 mm) feitas por Silva Junior et al. (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 são eventos raros.

A Figura 5 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. Essa condição concomitante

provocou sérios problemas para a cidade, e 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 quadratura¹, com preamares de 1,8 m e amplitudes próximas de 1 m. Nos demais eventos, as marés foram de sizígia², com preamares de 2,5 m e amplitudes acima de 2 m.

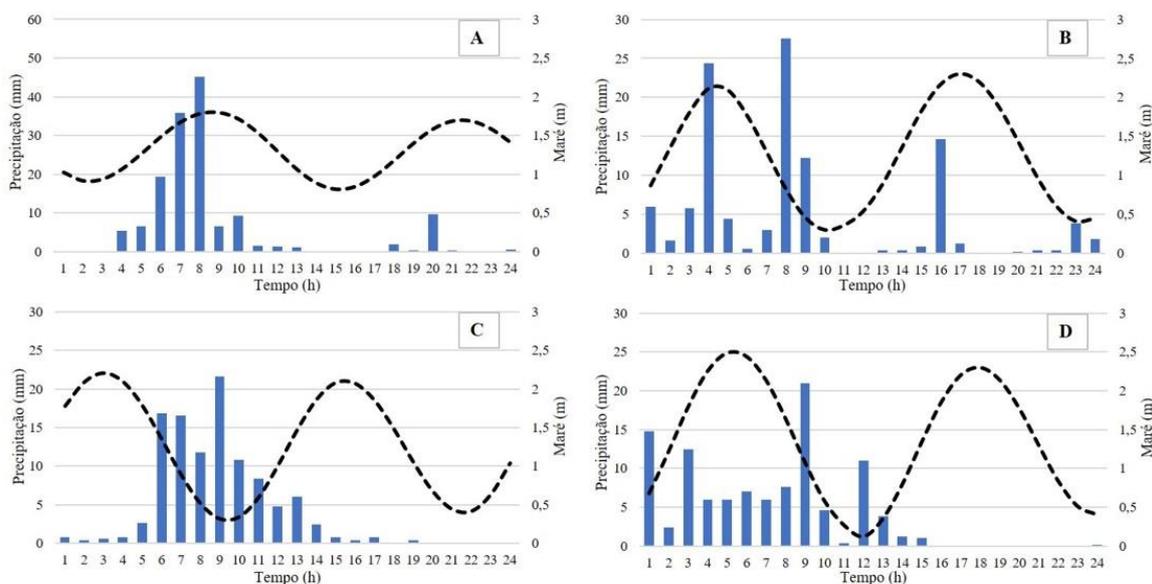
Silva Junior & Silva (2014) afirmam que a chuva ocorrida em 17/05/2013 correspondeu a 40% do total precipitado no mês de maio. Ainda sobre este evento, a maior parte do total precipitado (100,4 mm) ocorreu entre 5h00min e 8h00min, com preamar de 1,8 m às 8h57min (Figura 5). No evento chuvoso de 26/06/2014, Silva Junior et al. (2017) relatam que a chuva deste dia correspondeu a 35% do total precipitado no mês de junho. Neste dia, ocorria uma das partidas de futebol da Copa do Mundo de 2014, na cidade de São Lourenço da Mata (Região Metropolitana do Recife - RMR). A maior parte da chuva se concentrou em um curto período, com precipitação de 66,80 mm entre 6h00min e 10h00min. Na ocasião, a maré estava baixa, atingindo 0,30 m às 9h45min (Figura 5).

Recentemente, a cidade do Recife parou novamente diante dos episódios de chuvas extremas. O volume de chuva registrado em 13/06/2019 equivaleu a 15 dias do mês de junho, considerando a média histórica para o período de 389,60 mm, segundo os boletins divulgados pela

APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) e Prefeitura do Recife. Ainda segundo a Prefeitura, a Defesa Civil atendeu até às 17h00min, 227 ocorrências, fez 147 vistorias e atendeu a 80 pedidos de instalação de lonas em áreas de risco. Além disso, foram registradas 15 quedas de árvores, 26 semáforos danificados, várias ruas e avenidas alagadas, voos atrasados e cancelados, e aulas e expedientes suspensos. O total precipitado neste dia foi de 169,2 mm, com 144,6 mm em 12h00min (entre 7h00min e 19h00min). No início deste período, às 06h55min, a maré estava baixa (0,5 m) e atingiu o pico às 13h13min (2,3 m), quando 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 em um período inferior à 24 h. A Figura 6 mostra a distribuição dos totais máximos precipitados por fração de duração dos eventos considerados. Observa-se que, em média, 20% dos totais precipitados ocorreram em 1 h, representando uma intensidade de 25,5 mm h⁻¹. 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.

Com os cenários climáticos previstos para o Recife, tais eventos devem ficar mais recorrentes, mais intensos e bastante agravados pelo cenário de elevação do nível do mar.



¹ 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.

² Maré de sizígia ocorre durante as luas cheia e nova, quando a força gravitacional da lua combinada com a do sol, cria amplitudes maiores da maré.

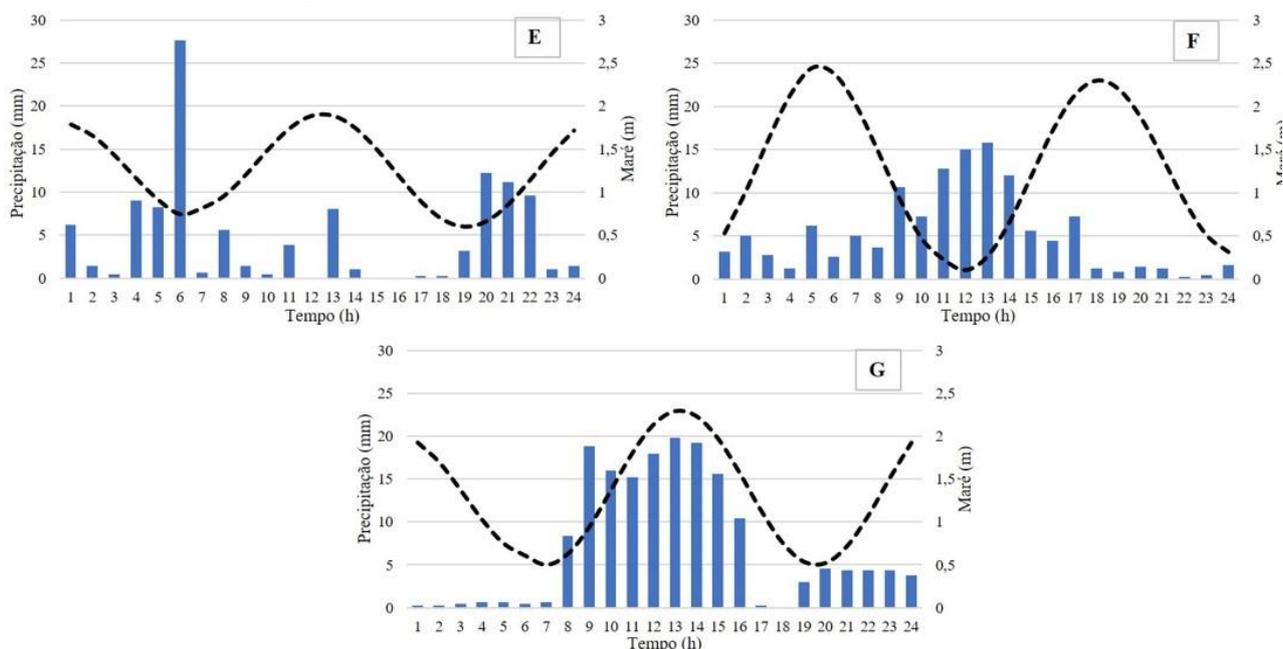


Figura 5. Precipitação e maré por evento extremo no Recife. a) 17/05/2013; b) 19/12/2013; c) 26/06/2014; d) 04/07/2015; e) 16/04/2016; f) 09/05/2016; g) 13/06/2019. Fonte: Baseado nos dados do INMET e Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e organizado por Silva Junior et al. (2020).

Tabela 3. Caracterização dos maiores eventos chuvosos ocorridos nos últimos cinco anos em Recife. Fonte: Baseado nos dados do INMET e Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e organizado por Silva Junior et al. (2020).

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

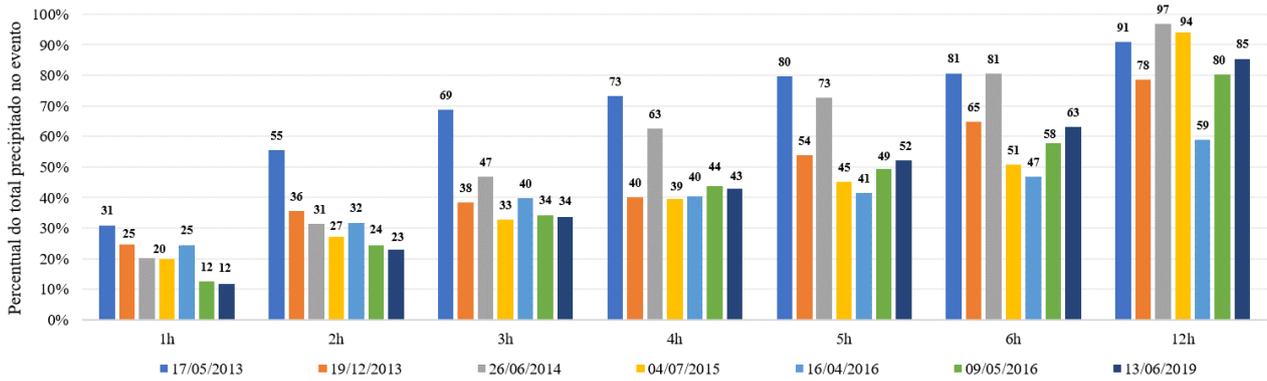


Figura 6. Distribuição percentual dos totais máximos precipitados por fração de duração dos eventos considerados. Baseado nos dados do INMET e organizado por Silva Junior et al. (2020).

Ações para mitigação dos impactos e adaptação da infraestrutura

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) apontou urgência no desenvolvimento de mecanismos institucionais voltados para as ações de adaptação dos ambientes urbanos frente às mudanças do clima.

Apesar da necessidade iminente, dada a alta vulnerabilidade do Recife, ações e medidas concretas para a adaptação da cidade ainda são incipientes. Boa parte das iniciativas que estão em voga baseiam-se na mitigação dos impactos. Silva Junior & Silva (2016) relatam que, basicamente, os planos, estudos e legislações até então existentes, discutem superficialmente a questão das mudanças climáticas focando, na maioria das vezes, apenas

na vulnerabilidade (a partir de projeções climáticas e ações de mitigação), sem estabelecer diretrizes efetivas para o desenvolvimento e implantação de políticas de adaptação.

No que concerne à drenagem urbana, a ideia de adaptar a infraestrutura para os cenários climáticos futuros é um grande desafio, não só diante das características 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 (Tabela 4).

Tabela 4. Alguns instrumentos de gestão estadual e municipal direcionados à questão das mudanças climáticas e sua relação com a drenagem urbana. Fonte: Silva Junior et al. (2020).

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 (Pernambuco, 2010)	2010	Desenvolver planos de ação para a mitigação ou adaptação às 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"> • Considerar na Política Estadual de Recursos Hídricos, a questão das mudanças climáticas a partir da definição das áreas mais vulneráveis e as 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 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 • Planejar ações emergenciais como a construção de bacias de estocagem em áreas de altimetria mais baixa, reduzindo os problemas de drenagem nesses locais.
	Plano Estadual de Mudanças Climáticas (Pernambuco, 2011a)	2011	Constituído 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.	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.

			Apresenta metas obrigatórias e gerais de mitigação e adaptação (previstas da Lei Nº 14.090/2010) para o horizonte de 6 anos.		2. Mitigação: <ul style="list-style-type: none"> • Promover intervenções periódicas de alargamento das calhas e/ou desassoreamento 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 (Recife, 2014)	2014	Cria instrumentos para efetivação de ações sustentáveis e de enfrentamento ao aquecimento global, a partir do: <ul style="list-style-type: none"> • Aumento da permeabilidade do solo; • Redução na formação de ilhas de calor, através da arborização; e • Estímulo por construções sustentáveis com o Programa de Premiação e de Certificação em Sustentabilidade Ambiental, além de obrigar, os empreendimentos geradores de impacto ambiental, a elaboração do inventário de emissão de gases do efeito estufa. 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) (Recife, 2016)	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 (Recife, 2019)	2019	O Plano elenca estratégias para adaptar os principais setores do município aos efeitos climáticos no cenário de 2040. Para isso, focou na gestão de risco associada ao clima, orientando mecanismos e metodologias para a adaptação de políticas setoriais da cidade.	Adaptação	Este Plano estabelece diretrizes para a gestão adaptativa, frente aos cenários de mudança do clima, e apresenta medidas (estruturais e/ou não) que podem ser adotadas nas áreas mais vulneráveis da cidade. Quanto à drenagem urbana, medidas prioritárias de adaptação, elencadas no Plano, foram baseadas em propostas de intervenção na infraestrutura discutidas no Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Recife (PDDR), publicado em 2016.

Nota: “Adaptação” refere-se às ações tomadas para diminuir os danos a serem provocados pelos efeitos das mudanças do clima. “Mitigação” refere-se aos esforços para reduzir a emissão dos gases do efeito estufa.

Atualmente, 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, concluído recentemente (no ano de 2019), que buscou avaliar a capacidade adaptativa das áreas mais vulneráveis e elencou

medidas (estruturais e/ou não) que diminuem as fragilidades da infraestrutura da cidade aos efeitos climáticos (Recife, 2019).

O horizonte temporal do Plano teve como *baseline* o período dos anos de 1976 a 2005, e em relação ao cenário futuro, o período de 2011 a 2040. Foram usados dois 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): o Eta-MIROC5 e o Eta-HadGem2-ES, considerando cenários de emissão e concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) definidos como otimista (RCP 4,5) e pessimista (RCP 8,5) (Recife, 2019).

Como resultado do plano, considerando os riscos climáticos mais expressivos (atribuídos à inundação por chuvas e à elevação do nível do mar), foram hierarquizadas as localidades mais vulneráveis da cidade. Para o risco de inundações por chuvas, considerando as projeções futuras, os bairros com as maiores ameaças são: Mustardinha, Campina do Barreto e IPSEP (Recife, 2019).

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, a cidade 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 & Ferreira (2015) avaliaram, através dos indicadores de 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 a 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 os eventos extremos, considerando, por exemplo:

- 1) A utilização, em larga escala, de medidas compensatórias e sua inclusão nas regulações municipais: No Recife, a Lei Nº 18.112 (Recife, 2015) estabelece o uso obrigatório de dispositivos de controle como reservatórios ou telhados verdes para as novas edificações com áreas de lotes $\geq 500 \text{ m}^2$;
- 2) Sistemas de alerta para os críticos eventos hidrometeorológicos: Em Pernambuco, a APAC faz tal monitoramento em tempo real, e emite boletins de alerta para a Defesa Civil, que são divulgados em mídias sociais e no próprio site da instituição; e
- 3) Ampliação e melhoria do monitoramento das variáveis hidrometeorológicas e a atualização de curvas IDF usadas para o dimensionamento de equipamentos de drenagem: No âmbito do projeto “Pluviômetro nas Comunidades”, em 2013, foram instalados 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. 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, 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. Nesse aspecto, o plano trouxe ganhos de informação sobre a infraestrutura de drenagem, antes pouco conhecida, através dos levantamentos cadastrais de todos os canais e 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 solucionarão os problemas atuais e poderão reduzir, concomitantemente, os efeitos climáticos futuros.

No Recife, medidas de adaptação, a partir de estruturas de engenharia convencional ou de pequenas estruturas descentralizadas (David & Cardoso, 2012), foram executadas pela Prefeitura, a saber: o sistema de bombeamento e de comportas no canal Derby-Tacaruna; a drenagem forçada na Av. Dom Hélder, no bairro do IPSEP; o reservatório de detenção subterrâneo entre as Ruas Santo Elias e Conselheiro Portela, no bairro do Espinheiro; e a instalação de válvula *flap* na saída da rede de microdrenagem da rua do Lima, no bairro de Santo Amaro.

Considerações finais

Evidências da magnitude e frequência dos eventos climáticos ainda são pouco precisos, diante da quantidade e qualidade dos registros de dados disponíveis. Isso porque, há vários problemas de falta de monitoramento contínuo e de escassez de informações/dados no âmbito local, dificultando, por exemplo, uma análise histórica da elevação do NMM ao longo da costa pernambucana.

É válido ressaltar que o aumento da vulnerabilidade das cidades costeiras aos efeitos climáticos futuros decorre, também, do aumento populacional, da acumulação de deficiências de planejamento e gestão municipal. É fato que tais aspectos só poderão ser superados em médio e longo prazo, embora demandem no atual momento uma série de ações efetivas, tendo como suporte os planos e estudos realizados.

Além disso, é importante que os gestores municipais, responsáveis por construir, manter e operar os sistemas de drenagem urbana em cidades costeiras, como o caso do Recife-PE, conheçam as características específicas de alagamentos e/ou inundações que ocorrem nessas regiões, gerados, particularmente, pelo efeito de marés, baixas cotas, lençóis freáticos elevados e alta pluviosidade.

As redes de drenagem do Recife, e de sua região metropolitana, precisarão ser readequadas e medidas adaptativas deverão ser implementadas, visando reparar a defasagem existente e diminuir os efeitos a serem causados pela mudança do clima.

Com a alta vulnerabilidade do Recife aos efeitos climáticos, a adoção de medidas adaptativas para a infraestrutura de drenagem se faz necessária e urgente. É importante ressaltar que a cidade se movimenta nesse sentido, reconhecendo as suas vulnerabilidades, sediando, em outubro de 2019, a primeira Conferência Brasileira de Mudança do Clima, e elaborando legislações e planos voltados para a mitigação dos impactos e adaptação da cidade à mudança do clima. Apesar das iniciativas, quando a pauta é drenagem urbana, a ideia de adaptar a infraestrutura para os cenários climáticos futuros ainda é um grande desafio, não só pelas

características urbanísticas e geográficas que a cidade possui, mas também pela dificuldade que o órgão gestor municipal tem em lidar com os problemas atuais de drenagem, que esbarra, quase sempre na falta de recursos.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de doutorado.

Referências

- ANA. 2010. Agência Nacional de Águas. Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão. Brasília-DF, 20p.
- Alcoforado, R. G. 2006. Simulação hidráulico-hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos: suporte de informações espaciais de alta resolução, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 139p.
- Cabral, J. J. S. P.; Alencar, A. V. 2005. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Recife e a convivência com as águas. Cooperação Brasil – Itália em saneamento ambiental, Ed. Gráfica Brasil. Brasília-DF, p. 111-130.
- Costa, M. B. S. F.; Mallmann, D. L. B.; Pontes, P. M.; Araújo, M. 2010. Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 5, (2), 341-349.
- David, L. M.; Cardoso, M. A. 2012. Adaptação às alterações climáticas de sistemas de drenagem urbana: medidas para o efeito combinado da precipitação e da subida do nível do mar. In: Encontro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 15., Portugal. Anais... Portugal: APESB. pp 1-17.
- Emlurb. 2016. 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. Recife-PE, 333p.
- Fernandes, M. C. L. 2008. Aquecimento global e possível expansão volumétrica das águas do oceano Atlântico na costa do NE do Brasil, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 62p.
- Fidem. 1980. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana do Recife. Recife-PE.

- Fonseca, R. G. 2017. Risco hidrológico: precipitações extremas, enchentes e alagamentos na cidade de Ituiutaba (MG), Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 151p.
- Fonseca Neto, G. C. 2018. Vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho cavouco em Recife em resposta às mudanças climáticas e à abertura das comportas da barragem de Carpina. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 86p.
- Fonseca Neto, G.; Neves, Y.; Silva Junior, M.; Rodrigues, A.; Araújo Filho, P.; Cabral, J.; Ferreira, E.; Gomes, M.; Sousa, S. 2017. Estimativa do nível de cheia em riacho urbano sob o efeito de chuvas torrenciais e da elevação do nível do mar. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 13., Porto. Anais... Porto: APRH. pp. 1-12.
- G1. 2016. Maré alta provoca alagamentos no centro do Recife. Disponível em: <http://g1.globo.com/pernambuco/netv-2-edicao/videos/t/edicoes/v/mare-alta-provoca-alagamentos-no-centro-do-recife/> 4941506/. Acesso em: 15 de abr. 2016.
- Georgeson, L.; Maslin, M.; Poessinouw, M.; Howard, S. 2016. Adaptation Responses to Climate Change Differ between Global Megacities. *Nature Climate Change*, 6, 584-588. doi:10.1038/nclimate2944
- IBGE. 2019. Estimativa populacional do Recife. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 5 de nov. 2019.
- IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>. Acesso em: 08 de mai. 2018.
- IPCC. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 08 de mai. 2018.
- Lafayette, F. B.; Silva, M. D.; Montenegro, S. M. G. L.; Silva, P. O.; Gusmão, R. D. 2018. Plano de gestão da manutenção da rede de drenagem da cidade do Recife. In: Simpósio de Recursos Hídricos do NE, 14., Maceió. Anais... Maceió: ABRH. pp. 1-10.
- Luna, R. M. R.; Garnés, S. J. A.; Cabral, J. J. S. P.; Santos, S. M. 2017. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). *Natural Hazards*, 86, (3), 1363-1376. doi: 10.1007/s11069-017-2749-y
- Marconi, M. A.; Lakatos, E. M. 2010. Fundamentos de metodologia científica, 7. ed. São Paulo: Atlas. 320p.
- 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. 2017. 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*, 6, 403-424. doi: 10.4236/ajcc.2017.62021
- Miguez, M. G.; Fernandes, L. C.; Azevedo, J. P. S.; Magalhães, L. P. C. 2011. Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: Nobre, C.; Young, A.; Gusmão, P. P. (Org.). Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: INPE/UNICAMP/UFRJ. pp. 123-144.
- Nunes, A. A.; Pinto, E. J. A.; Baptista, M. B. 2018. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23, (9), 1-13. doi: 10.1590/2318-0331.0318170134
- Oliveira, T. H.; Silva, J. E.; Santos, M. O.; Oliveira, J. S. S.; Galvêncio, J. D. 2015. Evolução espaço-temporal da drenagem superficial e do processo de impermeabilização em Santo Amaro, Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, (6), 1571-1587. doi: 10.26848/rbgf.v8.6.p1571-1587
- Oliveira, R. L. M. 2017. Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da cidade de Recife-PE, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife-PE, 101p.
- Pernambuco. 2010. Lei N° 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. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/lei%2014.090;141010;20101229.pdf. Acesso em: 15 de abr. 2019.

- Pernambuco. 2011a. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Plano Estadual de Mudanças Climáticas. Recife-PE, 94p.
- Pernambuco. 2011b. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. Comporta da Barragem de Carpina é aberta para evitar inundação na PE-50. Disponível em: http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=256:comporta-da-barragem-de-carpina-e-aberta-para-evitar-inundacao-na-pe-50&catid=1:latest-news&Itemid=72. Acesso em: 15 de abr. 2019.
- Pernambuco. 2009. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. Barragem de Carpina passa por teste de funcionamento de comporta. 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.
- PBMC. 2016. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro-RJ, 184p.
- Preuss, S. L. C.; Silva, A. A.; Braga, R. A. P.; Cabral, J. J. S. P. 2011. Adequação estrutural e ambiental para a drenagem urbana sustentável: o caso do Recife, Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., Maceió. Anais... Maceió: ABRH. pp. 01-19.
- Ramos, M. A.; Azevedo, J. R. G. 2010. Nova equação de chuvas intensas para a cidade de Recife - Pernambuco. In: Simpósio de Recursos Hídricos do NE, 10., Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABRH.
- Recife. 2019. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Índice de Risco à Mudança do Clima em Recife – PE. Recife-PE, 165p.
- Recife. 2017. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Projeto Pegada de Cidades: Inventário de Emissão de Gases de Efeito Estufa (2012-2015) e Pegada Hídrica (2015) do Recife. Recife-PE, 71p.
- Recife. 2016. Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). Recife-PE, 98p.
- Recife. 2015. Lei 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. Diário Oficial do Município de Recife, Recife, PE, 13 jan. 2015. Disponível em: <http://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280138>. Acesso em: 15 de abr. 2019.
- Recife. 2014. Lei 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. Diário Oficial do Município de Recife, Recife, PE, 30 abr. 2014. Disponível em: http://www2.recife.pe.gov.br/sites/default/files/3_lei_no_18.011_2014.pdf. Acesso em: 15 de abr. 2019.
- Silva, A. C. 2018a. Modelagem hidrológica-hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife-PE, 103p.
- Silva, E. C. 2018b. Variabilidade espaço-temporal da pluviosidade da Região Metropolitana do Recife, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 115p.
- Silva, P. O. 2019. Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica do Rio Tejiupió por Ocasão de Chuvas Intensas Levando em Conta o Efeito de Marés, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 231p.
- Silva, R. O. B.; Montenegro, S. M. G. L.; Souza, W. M. 2017. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas de Pernambuco. Eng. Sanit. Ambiental, 22, (3), 579-589. doi: 10.1590/s1413-41522017142481
- Silva, S. R.; Araújo, G. R. S. 2013. Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Geografia Física, 6, (5), 1371-1383. doi: 10.26848/rbgf.v6.5.p1371-1383
- Silva Junior, M. A. B.; Fonseca Neto, G. C.; Cabral, J. J. S. P. 2020. Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. Revista de Geografia (Recife), 37, (1), 222-240.
- Silva Junior, M. A. B.; Silva, S. R.; Cabral, J. J. S. P. 2017. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife-PE. RBRH, 22, (19), 1-12. doi: 10.1590/2318-0331.011716040
- Silva Junior, M. A. B.; Silva, S. R. 2014. Drenagem Urbana: O dia em que o Recife parou. Revista Construir NE, 71, 39-39.
- Silva Junior, M. A. B.; Silva, S. R. 2016. Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. Revista

- Brasileira de Geografia Física, 9, (6), 2034-2053. doi: 10.26848/rbgf.v9.6.p2034-2053
- Sousa Neto, G. M. 2009. Impactos do aumento do nível médio do mar em algumas capitais do nordeste brasileiro, e suas consequências ambientais, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 60p.
- Souza, W. M.; Azevedo, P. V. 2012. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, 5, (1), 143-159. doi: 10.26848/rbgf.v5.1.p143-159
- Souza, W. M.; Azevedo, P. V.; Araújo, L. E. 2012. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, 5, (2), 250-268. doi: 10.26848/rbgf.v5.2.p250-268
- Suassuna, C. C. A.; Ferreira, K. 2015. Cidade Resiliente: Um Sistema de Indicadores dos Aspectos Institucionais. In: Seminario Internacional sobre Ciências Sociales y Riesgos de Desastre: um encuentro inconcluso, 1., Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: LPED/UAM/PIRINA/UBA. p. 1-16.
- Wanderley, L. S. A.; Nóbrega, R. S.; Moreira, A. B.; Anjos, R. S.; Almeida, C. A. P. 2018. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. Revista Brasileira de Climatologia, 22, 149-164. doi: 10.5380/abclima.v22i0.56034