PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

REVISTA DE
GEOGRAFIA

Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia>

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUBSIDÊNCIA DO TERRENO COMO DIFICULDADES PARA A GESTÃO URBANA DE UMA AVENIDA MARGINAL DE CURSO D'ÁGUA EM CIDADE COSTEIRA

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral¹, Alexandre Duarte Gusmão², Marcos Antonio
Barbosa da Silva Junior³, Edenia Nascimento Barros⁴

¹ Universidade de Pernambuco e Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: jcabral@ufpe.br; <https://orcid.org/0000-0002-1348-8004>

² Universidade de Pernambuco e Instituto Federal de Pernambuco. E-mail: alex.gusmao@poli.br; <https://orcid.org/0000-0002-7817-6124>

³ Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: marcos15barbosa@hotmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-2678-9420>

⁴ Universidade de Pernambuco. E-mail: enb_pec@poli.br; <https://orcid.org/0000-0001-5970-6823>

Artigo recebido em 11/12/2020 e aceito em 27/06/2021

RESUMO

Com os efeitos do clima em mudança, as áreas urbanas de planícies costeiras apresentam riscos climáticos iminentes quanto ao aumento na ocorrência e intensidade de precipitações extremas e à elevação do nível do mar. Além disso, outro fator relevante está associado à subsidência do terreno, que representa o rebaixamento superficial atrelado à aplicação de cargas e/ou exploração de água subterrânea. Tal situação já caracteriza algumas localidades do Recife, em Pernambuco, e a conjuntura dessas peculiaridades, num cenário de clima alterado, fragilizará ainda mais o desempenho de parte da infraestrutura de drenagem urbana. Nesse aspecto, este estudo avalia os alagamentos ocorridos numa avenida situada às margens de canal, associadas a: subsidência da avenida, aumento da impermeabilização no entorno, aumento da intensidade das chuvas e elevação do nível do mar. Além disso, traz uma análise expedita da situação futura, considerando mudanças no clima (chuvas intensas e marés), condições geotécnicas e atividade antrópica.

Palavras-chave: chuvas intensas; marés; recalque; urbanização; alagamentos.

CLIMATE CHANGE AND LAND SUBSIDENCE AS DIFFICULTIES FOR URBAN MANAGEMENT OF A MARGINAL WATERCOURSE AVENUE IN COASTAL CITY

ABSTRACT

With the effects of climate in change, urban areas on coastal plains present climatic risks due to the increase in the intensity of precipitations and from rising sea levels. Another relevant factor is associated with the subsidence of the land, which represents the lowering of the land by application of loads and/or exploitation of groundwater. This situation already characterizes some locations in the city of Recife, in Pernambuco, and the conjuncture of such peculiarities, in an altered climate scenario, will further weaken the performance of part of the city's urban drainage infrastructure. The present study evaluates the flooding that occurred on avenue located on the margins of canal, associated with: subsidence of the rolling road, increased waterproofing in the surroundings, increased intensity of rain and rising sea level. In addition, it brings a simplified analysis of the future situation, considering climate changes (heavy rains and tides), geotechnical conditions and anthropic activity.

Keywords: heavy rains; tides; land subsidence; urbanization; floods

CAMBIO CLIMÁTICO Y SUBSIDENCIA TERRESTRE COMO DIFICULTADES PARA LA GESTIÓN URBANA DE UNA AVENIDA MARGINAL DE CURSO DE AGUA EN CIUDAD COSTERA

RESUMEN

Con los efectos del cambio climático, las llanuras costeras urbanas presentan riesgos climáticos inminentes en cuanto al aumento en la ocurrencia e intensidad de lluvias extremas y el aumento del nivel del mar. Además, otro factor relevante está asociado al hundimiento del terreno, que representa la bajada ligada a la aplicación de cargas y/o explotación de aguas subterráneas. Esta situación ya caracteriza a algunas localidades de Recife, en Pernambuco, y la coyuntura de estas peculiaridades, en un escenario climático modificado, debilitará aún más el desempeño de parte de la infraestructura de drenaje urbano. En este aspecto, este estudio evalúa las inundaciones ocurridas en una avenida ubicada a orillas del canal, asociadas a: hundimiento de la avenida, mayor impermeabilización en los alrededores, mayor intensidad de lluvia y aumento del nivel del mar. Además, trae un análisis expedito de la situación futura, considerando cambios en el clima (lluvias intensas y mareas), condiciones geotécnicas y actividad antrópica.

Palabras clave: lluvia intensa; mareas; represión; urbanización; inundaciones

INTRODUÇÃO

O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC, em sua sigla em inglês), publicado em 2014, afirma 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 (KIRSHEN et al., 2015; IPCC, 2014; MIGUEZ et al., 2011).

Essa situação é mais agravada nas áreas urbanas de planícies costeiras, como a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, que teve seu processo de ocupação de forma desordenada e possui 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 et al., 2018; SILVA JUNIOR et al., 2017; SILVA JUNIOR; SILVA, 2016). O Recife, atualmente, tem população de 1,64 milhões de pessoas e densidade populacional de 7.039,64 hab/km², enquanto que a sua Região Metropolitana tem população estimada de 4,05 milhões de habitantes (IBGE, 2019).

De acordo com o PBMC (2016), 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. Ainda segundo o PBMC (2016), as tendências climáticas projetadas até o ano de 2100 revelam aumento das temperaturas (máximas e médias) e das chuvas extremas no município. 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 baseada em séries históricas de 1986 a 2005 (IPCC, 2014).

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 inundaço, em ambos os cenrios, os autores chamam ateno para o Recife Antigo, que um importante centro econmico e administrativo da cidade e possui grande valor histrico e cultural.

Alm da alta vulnerabilidade inundao em cenrio de elevao do nvel do mar, o aquecimento da cidade e a mudana da hidrologia urbana tem provocado intensificao das precipitaes pluviomtricas. Alguns estudos tem mostrado aumento na ocorrncia de chuvas

diárias acima de 100 mm nos últimos 60 anos (SILVA JUNIOR et al., 2020; RECIFE, 2019; WANDERLEY et al., 2018; SILVA et al., 2017; PBMC, 2016; SOUZA; AZEVEDO, 2012).

Um outro fator que aumenta os riscos de alagamentos é a subsidência do terreno que, de maneira simplificada, pode ser considerada como a soma do deslocamento vertical do aquífero profundo e do deslocamento vertical da camada de solo devido ao peso dos aterros e das construções. Luna et al. (2017) identificaram subsidência do terreno menores que 1mm ao ano, provocada por exploração da água subterrânea na zona sul do Recife. Ainda segundo os autores, quando o rebaixamento do terreno ocorre por acréscimo de carga/aterro, o deslocamento pode chegar a alguns centímetros por ano em locais da cidade onde há depósitos de argila mole. Sendo assim, no presente artigo será dada ênfase à deformação do subsolo por acréscimo de carga.

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de várias cidades do mundo acarretou processos de subsidência do solo, o que tem exigido que a gestão urbana inclua o risco de rebaixamento do terreno como um dos fatores importantes para eficiência operacional das infraestruturas.

Na cidade de Jakarta, na Indonésia, o desenvolvimento urbano produziu subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea, carga dos prédios e construções e a própria consolidação dos depósitos aluviais (ABIDIN et al., 2011).

Na cidade de Como, no norte da Itália, consolidada ao lado do lago Como e próxima aos Alpes, estima-se que o desenvolvimento urbano produziu um rebaixamento do terreno de 2 centímetros por ano, durante o período de 1950 a 1975. Tal fato levou ao risco de inundações na cidade, quando o lago atingia níveis mais elevados, fazendo com que a gestão municipal local adotasse diversas medidas para mitigar o impacto (FERRARIO et al., 2015).

Em Shanghai, verificou-se, também, a interdependência entre atividades urbanas e subsidência do solo, levando a rebaixamento de prédios e rachaduras nas infraestruturas, exigindo maiores cuidados da gestão municipal. O monitoramento indicou um rebaixamento médio de 1,92 m ao longo de 84 anos, correspondendo a uma velocidade de 2,3 cm por ano (WANG et al., 2013).

Em condições similares ao Recife, com combinação de chuvas extremas, elevação do nível do mar e subsidência do terreno, encontra-se a cidade de New Orleans. Está situada no sudeste da Louisiana (EUA), território na planície estuarina do Mississippi 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 et al. (2003) relatam que além de estar situada abaixo do nível mar (1,5 a 3,0 metros), o território também sofre com subsidência e 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.

Nesse contexto, este artigo avalia as causas dos alagamentos em uma avenida perimetral situada nas margens de um canal em área do Recife, associadas a: aumento da intensidade das chuvas e elevação do nível do mar (condições hidrológicas); subsidência da pista de rolamento (condições geológicas e geotécnicas); e aumento da impermeabilização da área de entorno (atividade antrópica).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo enquadra-se como exploratório e descritivo, quanto aos fins, e como pesquisa bibliográfica, baseada numa revisão de literatura, quanto aos meios (MARCONI; LAKATOS, 2010). Desse modo, foram levantados estudos científicos, relatórios técnicos e planos, focando na cidade do Recife, que versavam sobre a vulnerabilidade da drenagem local diante das mudanças do clima (aumento do nível do mar e das intensidades das chuvas), da subsidência do terreno por acréscimo de carga/aterro e da atividade antrópica.

Para tanto, inicialmente, foi feita a caracterização do local de estudo sob a ótica das condições físicas (hidrológica e geotécnica) e atividade antrópica. O local escolhido, situado em área urbana de planície estuarina e costeira da cidade, concentra a conjuntura de fatores que contribuem para os alagamentos in loco: hidrológico (mudanças do clima); geológico e geotécnico (subsidência do terreno); e antrópico (alteração do espaço urbano).

Na abordagem hidrológica, foi delimitada e caracterizada a bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna e de seus tributários, utilizando dados altimétricos de alta resolução do PE3d (CIRILO et al., 2014; PERNAMBUCO, 2016) e informações cadastrais de drenagem do ESIG-Drenagem (PREFEITURA DO RECIFE, 2016). Além disso, foram espacializados os pontos críticos de drenagem na área de estudo e relatados alguns episódios de alagamentos

associados a combinação de fatores como chuva intensa e maré alta. Na abordagem geológica, utilizou-se recursos como mapas geológicos-geotécnicos e perfis de sondagem nos pontos mais críticos de subsidência do terreno, presentes na área de estudo, para subsidiar as análises de recalque do solo. Na abordagem sobre atividade antrópica, foram relatados, a partir de informações literárias, o processo de formação da cidade focando na área estudada, usando, inclusive, ortofotocartas para visualização da consolidação da urbanização no local.

Por fim, foi feita uma análise expedita da situação atual e das perspectivas futuras para a área, levando em conta as mudanças do clima (chuvas intensas e marés), as condições geotécnicas (subsidência do terreno) e a atividade antrópica, a partir de ações do poder público no local.

ÁREA DE ESTUDO

A avenida Governador Agamenon Magalhães, com extensão de 5,60 km, ocupa seis faixas de rolamento em cada lado do canal Derby-Tacaruna, e tornou-se o principal eixo de transporte na cidade do Recife (Figura 1). Ela desempenha uma função de via perimetral circundando os bairros do centro do Recife, além de fazer a ligação da cidade de Olinda e dos bairros da zona norte do Recife com os bairros da zona sul da cidade, incluindo o Aeroporto Internacional dos Guararapes.

Figura 1 - a) Trecho da cidade de Recife mostrando a avenida Governador Agamenon Magalhães, b) canal Derby-Tacaruna na faixa central da avenida.

Fonte: NE 10 (2018).

O canal Derby-Tacaruna, principal infraestrutura de drenagem local, tem sofrido diversos problemas de extravasamentos nos últimos anos, causando sérios prejuízos para a mobilidade urbana com reflexos no comércio e nos serviços do Recife e cidades vizinhas. Historicamente, o canal foi construído no local de 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.

Na extremidade norte do canal, aproximadamente 30 hectares de mangue foram aterrados (PEDROSA, 2007), onde hoje se encontra o Shopping Tacaruna e o prédio da antiga fábrica Tacaruna. Na extremidade sul, os aterros dos mangues formaram grande parte dos bairros da Ilha do Leite, Ilha do Retiro e Paissandu.

Na década de 60 do século XX, a gamboa foi canalizada e foi construída a avenida. Depois de alguns anos da construção, começaram os problemas de extravasamento do canal e alagamento da avenida. 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.

O canal Derby-Tacaruna apresenta 5,30 km de extensão, seção trapezoidal de 45,0 m² e fundo praticamente plano, resultando num volume de reservação de 238.500 m³ (EMLURB, 2016). O canal possui a saída Sul conectando com o rio Capibaribe, perto do Hospital Português, e a saída Norte conectando com o rio Beberibe nas imediações do Shopping Tacaruna.

Entre os anos de 1998 e 1999, foram construídas, em cada extremidade, comportas para controlar o fluxo das águas no canal, que nas marés altas (acima de 2,20 m pela cota do DHN), provocavam transbordamentos nas imediações do Parque Amorim (Bairro da Boa Vista). Atualmente, está em operação um sistema de drenagem forçada na extremidade norte, próxima ao Shopping Tacaruna, composto por três bombas de 1 m³/s visando reduzir os níveis d'água e garantir eficiência do sistema de microdrenagem das áreas de contribuição ao canal, na ocorrência combinada de chuva intensa e maré alta. (Figura 2). Em Recife, as marés são informadas pela referência de nível do DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação enquanto as ruas e lotes utilizam as cotas do IBGE. Para obter as informações das marés no referencial do IBGE deve-se subtrair 1,14 m das informações do DHN.

Figura 2 - Sistema de comportas a) Comporta e bombeamento na extremidade Shopping Tacaruna (Norte). b) Comporta na extremidade Hospital Português (Sul).

Caracterização Hidrológica

O canal Derby-Tacaruna possui bacia de drenagem com área de 5,83 km² e que abrange parte das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe e Beberibe. A declividade média do terreno

na bacia é de 4,40%, o que a caracteriza como plana à suavemente ondulada. A Figura 3 apresenta a espacialização das bacias de drenagem dos tributários do canal Derby-Tacaruna.

Figura 3 - Bacias de drenagem e áreas de contribuição na área de estudo e seu entorno.

A bacia de drenagem contempla quatro sub-bacias dos tributários Santa Terezinha, Chié, Cohab e Torreão (Tabela 1). Os referidos quatro pequenos canais que chegam ao canal Derby-Tacaruna apresentam vazões pouco expressivas.

Tabela 1 - Caracterização das bacias de drenagem na área de estudo e no entorno.

Bacia	Caracterização física das sub-bacias						Canal / Curso d'água	
	Curso d'água	Área (km ²)	Dec. média (%)	Área impermeável (%)	Área permeável (%)	CN	Comp. (km)	Dec. média (%)
Capibaribe	Derby- Tacaruna	3,39	4,42%	-	-	85,00	3,30	0,022
Beberibe	Derby- Tacaruna	2,44	4,37%	-	-	85,00	1,96	0,035
Beberibe	Santa Terezinha	0,28	3,64%	18%	82%	78,35	0,75	0,133
Beberibe	Chié	0,41	3,98%	64%	36%	89,12	0,30	0,215
Beberibe	Cohab	0,34	4,31%	62%	38%	88,50	0,38	0,250
Beberibe	Torreão	0,32	4,32%	69%	31%	89,85	0,32	0,157

Fonte: EMLURB (2016); PERNAMBUCO (2013); Autores (2020).

A Figura 4 mostra o MDT gerado para a bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna, com variações de cotas entre -0,40 e 10,00 metros, e altimetria média de 3,45 m.

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).

Mesmo com comportas e bombeamento, ultimamente o canal Derby-Tacaruna tem apresentado transbordamentos nas imediações do Parque Amorim (Figura 5), provocando

alagamentos na avenida Governador Agamenon Magalhães quando há chuvas intensas e maré alta, como ocorrido em junho de 2015 e em setembro de 2019 (Tabela 2).

Figura 4 - Modelo Digital do Terreno (MDT) da bacia do canal Derby-Tacaruna.

Tabela 2 - Extravasamentos recentes do canal Derby-Tacaruna (dados de chuva da estação Recife-Porto cód. APAC: 1284 e previsões de maré do Porto do Recife).

Data	Hora - chuva mais intensa	Intensidade da chuva	Precipitação em 24 horas	Pico de maré DHN/ hora do pico
25/06/2015	7h20 / 8h20	28 mm/h	51,4 mm	1,80 m / 10h35
02/09/2019	6h20 / 7h20	35,8 mm/h	63,0 mm	2,60 m / 05h56

Figura 5 – Transbordamentos do canal Derby-Tacaruna. A) 25/06/2015; b) 02/09/2019.

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

Caracterização Geológica

A planície de Recife apresenta uma grande heterogeneidade de ambientes que constituem o reflexo da dinâmica de sua formação em diferentes escalas espaciais e temporais. Os setores situados nas proximidades da zona costeira e dos cursos fluviais de maior volume são caracterizados por uma topografia plana a levemente plana e apresentam menores cotas altimétricas, como resultado da atuação de processos marinhos, flúvio-marinhos e fluviais (MUEHE, 2006; SOUZA, 2013).

Sua morfologia resulta das sucessivas transgressões e regressões marinhas (Figura 6) decorrentes de episódios de glaciação e interglaciação, ocorridos durante o período Quaternário (DOMINGUEZ, 1990).

Figura 6 – Diagrama esquemático da deposição de sedimentos na transgressão e regressão marinha.

Fonte: Gusmão Filho (2002).

Na planície do Recife, o embasamento cristalino pré-cambriano é recoberto pelo pacote sedimentar pertencente às bacias sedimentares Pernambuco e Paraíba, sedimentos terciários da Formação Barreiras, e em sua porção mais superficial por sedimentos quaternários com coexistência de diferentes processos de deposição ao longo de sua extensão. Entre os diversos tipos de sedimentos da planície, a área em estudo é formada por sedimentos fluvio-lagunares e sedimentos de Mangue cujas características são função da composição química, granulometria, textura e idade dos pacotes sedimentares (CPRM, 2001).

Em diversos locais, apresenta um pacote arenítico e uma camada de granulometria siltico-arenosa e/ou argilo-arenosa de consistência mole logo abaixo do arenito, só aparecendo material resistente de 15 a 30 m de profundidade. Há uma frequência de depósitos de argila siltosa com presença de matéria orgânica de consistência mole a muito mole, alta compressibilidade e uma espessura maior que 25 m (GUSMÃO FILHO, 2002).

Por sua vez, os sedimentos de mangue são formados por material composto por argila, silte e areia fina e grande quantidade de matéria orgânica que se acumula em depósitos turfosos nos ambientes estuarinos situados nos cursos finais dos rios Beberibe e Capibaribe (GUSMÃO FILHO, 2002).

Na planície de Recife, convergem os rios Capibaribe, Beberibe e Tejiupió na feição de um estuário compartilhado cuja geomorfologia depende dos sedimentos trazidos pelos rios, mas

também, trazidos pelo mar. Quanto aos sedimentos fluviais, o sistema deposicional é muito espalhado com semelhança ao modelo chamado por Miall (1990) de distributário.

Ao longo do percurso do canal Derby-Tacaruna, o processo de sedimentação apresenta algumas variantes, podendo ser classificados nos tipos: terraço indiferenciado (Figura 7), planície de maré e planície fluvio-lagunar (COSTA et al., 1994; CPRM, 1994; LIMA FILHO et al., 1991; SOUZA et al., 2017).

No primeiro processo, houve interações entre os terraços fluviais do rio Capibaribe e os terraços marinhos durante as duas últimas transgressões ocorridas a 10.000 e 5.100 anos BP., apresentando grande variação sedimentológica e estratigráfica. No segundo tipo, se enquadram as áreas planas situadas ao longo da zona de contato entre os baixos cursos fluviais, nas áreas que sofrem influência da maré ocupadas pela vegetação de mangue. O terceiro tipo inclui as áreas baixas sujeitas a inundações periódicas, compostas pelos sedimentos localizados nas proximidades dos corpos hídricos fluviais das bacias do Capibaribe e Beberibe, se estendendo como uma franja ao longo dos seus cursos na planície.

Figura 7 - Características geológicas da planície de Recife.

Fonte: Oliveira (2018).

Atividade Antrópica

Ao longo de mais de quatro séculos, o espaço das águas na planície de Recife vem sendo aterrado para fins de urbanização. Somente na área do centro da cidade, que corresponde atualmente aos bairros do Recife, Santo Antônio, São José e Boa Vista, foi aterrada uma área de cerca de 190 ha, a uma profundidade média de 2,50 m até a data de 1907 (GUSMÃO FILHO, 2002). Ao longo do século XX, os aterros continuaram se expandindo, atingindo os bairros de Ilha do Leite, Paissandu e Santo Amaro que fazem parte da área de estudo do presente artigo.

A ação do homem constitui-se em um relevante agente modificador do meio ambiente, alterando o equilíbrio e a dinâmica dos processos naturais. Essas modificações acabam por gerar uma série de desequilíbrios na paisagem, acarretando na incidência de diversos impactos ambientais ao longo da paisagem, como resultado do reajuste do sistema às novas condições de equilíbrio (GIRÃO; CORRÊA, 2004).

Os cursos d'água tiveram suas seções transversais estreitadas e foram canalizados. A canalização de rios e córregos urbanos, além de causar uma série de prejuízos ao meio ambiente, por descaracterizar totalmente o hábitat natural, provoca o início de uma cadeia recorrente de problemas: favorecimento de ligações de esgotos clandestinos, ocupação das margens e das áreas de expansão de cheias, problemas de enchentes a jusante e o isolamento da conexão hidráulica entre o aquífero e o rio (CABRAL et al., 2001).

Conforme já informado, a avenida Governador Agamenon Magalhães foi construída margeando a gamboa que ligava os manguezais dos rios Capibaribe e Beberibe. Pela topografia local, os terrenos das margens da gamboa eram invadidos pela água por ocasião das marés altas e receberam grandes volumes de aterros, na faixa de 3 a 5 metros de altura, para a construção da avenida.

Até a primeira metade do século XX, fora as áreas de mangues, os terrenos adjacentes eram ocupados por sítios e grandes quintais. Nas últimas décadas, a área ficou altamente urbanizada, sendo o solo altamente impermeabilizado com todos os terrenos ocupados por empreendimentos comerciais e grandes prédios residenciais ou empresariais.

Durante o processo de ocupação acelerado e não planejado, o Recife perdeu muitos de seus cursos d'água secundários e confinou as seções de escoamento das calhas principais, de modo que a capacidade de transporte de águas pluviais urbanas foi substancialmente diminuída. Paralelo a isto, a produção de deflúvios foi aumentada pela impermeabilização do solo local.

Na Figura 8 é possível observar como se deu tal processo de urbanização entre 1956 e 2007, tomando como exemplo as extremidades do canal Derby-Tacaruna.

Figura 8 - 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); Autores (2020).

DISCUSSÃO

Condição Hidrológica (Mudança do Clima)

a) Elevação do Nível do Mar:

De acordo com PBMC (2016), o nível do mar na costa pernambucana aumentou 5,60 mm/ano no período de 1946 a 1988, uma elevação de 24 cm em 42 anos.

O IPCC (2014) revela que, para a região do litoral brasileiro, espera-se um aumento de 0,40 a 0,50 m no NMM até 2100, cenário otimista (com a estabilização na emissão de gases do efeito estufa), e aumento de 0,60 a 0,70 m, cenário crítico (com o aumento na emissão de gases do efeito estufa). Para o Recife, a maré de 2,70 m (referência DHN) corresponde a cota

1,56 m (referência do IBGE). Considerando as projeções do IPCC (2014), o cenário otimista terá marés máximas de 3,20 m (cota 2,06 m), enquanto o cenário crítico apresentará marés máximas de 3,40 m (cota 2,26m).

Atualmente, com amplitudes de maré de 2,70 m e sem chuvas, algumas áreas da cidade já apresentam alagamentos: nos bairros de Santo Amaro – rua Dr. Silva Ferreira, rua da Aurora, rua Capitão Lima, 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. Para uma maré de 3,20 m, obviamente uma área muito maior vai sofrer os alagamentos.

Na bacia de drenagem do canal Derby-Tacaruna, as comportas das duas extremidades exercem o controle para que na maré alta de sizígia, a água não invada o canal. Com o aumento do nível do mar, é importante que a altura das comportas seja ampliada, evitando que as águas da maré alta passem por cima das mesmas.

Outra preocupação é a entrada de água por subsuperfície. Para uma maré de 3,20 m, obviamente o nível da água na região estuarina dos rios Capibaribe e Beberibe ficarão muito mais elevados. Com as comportas fechadas, o nível do canal fica baixo de início e, conseqüentemente, o gradiente hidráulico entre os rios e o canal ficará mais intenso e poderá provocar percolação das águas pelo subsolo, contribuindo com mais água para o canal.

b) Aumento das Intensidades de Chuva:

Estudos recentes de Silva Junior et al. (2020), Wanderley et al. (2018), Silva et al. (2017) e Souza e Azevedo (2012) indicaram haver aumento na ocorrência de chuvas muito fortes (≥ 100 mm) e concentradas em 24h no Recife, nos últimos 60 anos.

Analisando os dados de precipitação pluviométrica de 2010 a 2016 na cidade, Silva (2018) verificou que para os anos observados, ocorreram 179 eventos que ultrapassaram 50 mm de chuva em 24h. Desse total, 70% superaram 100 mm em 24h. Ainda segundo o autor, o ano de 2011 apresentou o maior número de eventos extremos, com um total de 38 eventos com chuvas maiores que 50 mm em 24h.

Alguns eventos são extremamente intensos, como o ocorrido em 30 de maio de 2016, em consequência da convergência de umidade em baixos e médios níveis da atmosfera, que aliados ao cisalhamento do vento em médios níveis, produziram chuvas de grande intensidade em Recife e Olinda. Os totais pluviométricos chegaram a 240 mm no dia. Os pluviômetros do

CEMADEN registraram o intervalo das 08:00 às 09:00 (hora local) como a hora mais chuvosa, atingindo 70,4 mm no posto do Porto de Recife.

Silva Junior e Silva (2016) compararam as intensidades de chuva calculadas para o Recife através das equações IDF da Fidem (1980) 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, considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos, que são recorrências utilizadas no dimensionamento de infraestrutura de drenagem urbana.

Recife (2019) afirma que as projeções futuras de precipitação geradas para a cidade através dos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando os cenários intermediário (RCP 4,5) e o pessimista (RCP 8,5), 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.

Condição Geológica-Geotécnica (Subsidência do Terreno)

Para a construção da avenida na década de 60 do século passado, foi executado um aterro com espessura de 3,0 metros (ou mais em alguns trechos) e sobre o aterro, foi construído o pavimento do tipo placa de concreto com espessura de 20 cm. O subsolo, ao longo da avenida, apresenta depósito de argila mole com espessura variando de 3,0 a 22,0 m. Tem-se, portanto, um clássico exemplo de aterro sobre solos moles, com recalques de grande magnitude.

A Figura 9 mostra uma foto atual do trecho da avenida, onde ocorreu um recalque de cerca de 1,50 m. A Figura 10 apresenta o perfil geotécnico típico próximo ao Clube Português, onde foi executado um aterro de 3,00 m de espessura sobre o terreno, com uma camada de argila mole de 22,00 m de espessura. Observa-se ainda que, o nível da avenida, na época da sua construção, era o mesmo do pontilhão, que está apoiado em estacas profundas e não apresentou recalque significativo. Além dos problemas de drenagem, o desnível na avenida também causa problemas com o tráfego de veículos.

Figura 9 - Recalque atual da avenida no trecho próximo ao Clube Português.

Figura 10 - Perfil geotécnico do terreno em trecho ao longo da avenida Governador Agamenon Magalhães próximo ao Parque Amorim, observando-se a espessa camada de argila orgânica.

Perfil do subsolo na avenida
Sondagens de
Reconhecimento a
Percussão com Classificação
do Material

Esquerda – Parque Amorim

Direita – Próximo do CREA

Para se fazer uma previsão do recalque remanescente nesse trecho da avenida, foram admitidas as seguintes hipóteses:

- Perfil geotécnico apresentado na Figura 10;
- Recalque de 1,8 m em um período de 60 anos (1960 a 2020), ou seja, velocidade média de recalque igual a 30 mm/ano;
- Adensamento médio do solo mole após 60 anos igual a 95%;
- Recalque do solo mole apenas por adensamento primário.

O coeficiente de adensamento vertical retro analisado é igual a 6×10^{-8} m²/segundo, que é um valor típico para as argilas moles do Recife.

Admitindo-se que a deformação do solo mole estabilize para um adensamento médio de 99%, o recalque remanescente é igual a 10 cm em 34 anos, que corresponde a cerca de 3 mm/ano.

Conclui-se, portanto, que nesse trecho da cidade do Recife, o processo de subsidência do terreno influencia mais a drenagem da avenida do que o eventual processo de elevação do nível do mar decorrente das mudanças climáticas.

Atividade Antrópica (Ações do Poder Público Municipal)

Ao longo das últimas décadas, o poder público, por meio da Prefeitura do Recife, tomou algumas decisões para enfrentar o problema da subsidência do terreno e os recorrentes alagamentos.

Como informado anteriormente, uma das decisões foi a construção do sistema de comportas nas extremidades do canal Derby-Tacaruna, visando controlar a entrada das águas dos rios Capibaribe e Beberibe durante a ocorrência das marés de sizígia. Por muitos anos, o sistema funcionou bem nos dias de marés de sizígia e sem chuva. Porém, quando havia coincidência de chuvas intensas com o pico das marés de sizígia, as comportas precisavam ser abertas para escoar as águas das chuvas e, nessa ocasião, as águas de maré da região estuarina entravam no canal provocando os alagamentos na avenida Governador Agamenon Magalhães.

Para melhorar essa situação, a Prefeitura instalou um sistema de bombeamento na extremidade norte do canal, constando de três bombas com capacidade de vazão de 1,0 m³/s

cada uma. A situação melhorou um pouco, mas, atualmente, já se reconhece a necessidade de aumentar a capacidade de bombeamento.

PERSPECTIVAS E COMENTÁRIOS FINAIS

De maneira geral, tem-se verificado no Recife, e em outras cidades brasileiras, que as questões de drenagem urbana são bastante multidisciplinares. Não basta só a abordagem Hidráulica e Hidrológica. É necessário o conhecimento Geológico e Geotécnico, além dos estudos de Urbanismo e das Ciências Sociais, para um adequado gerenciamento, operação e manutenção da infraestrutura de águas pluviais urbanas.

Recentemente, o poder público municipal recifense vem se conscientizando dos riscos da elevação do nível do mar e do aumento das precipitações intensas, somados à subsidência do terreno ao longo da avenida marginal ao canal Derby-Tacaruna, a Governador Agamenon Magalhães. Tal compreensão exige uma contínua avaliação dos riscos, da vulnerabilidade e a necessidade de tomada de decisões. Além disso, o agravamento dos alagamentos no local exige, também, um melhor do manejo das águas pluviais urbanas, contando com a participação da sociedade civil, para enfrentar os riscos conjuntos de subsidência do terreno, elevação do nível do mar e ocorrência de chuvas mais intensas.

Para avaliação contínua dos riscos, é necessário que a cidade instale um sistema de monitoramento do nível do terreno e da água no canal Derby-Tacaruna, a fim de fornecer subsídios para entendimento dos processos geotécnicos e hidrodinâmicos que estão ocorrendo no local. O monitoramento conjunto permitirá que seja feita uma reavaliação periódica e que sejam identificadas as opções disponíveis para novas tomadas de decisão.

Numa grande cidade, a participação da população é fundamental em todas as decisões e, no caso da avenida Governador Agamenon Magalhães, sua relevância se torna maior em função da drenagem urbana, do fluxo de veículos, do transporte de passageiros e de cargas. Dessa forma, para uma efetiva participação da população, é necessário o desenvolvimento de programa de educação hidroambiental, que favoreça a conscientização das pessoas sobre as vulnerabilidades e os riscos climáticos atuais e futuros.

Por fim, é importante aprimorar as ações da defesa civil e dos sistemas de alerta, incluindo previsão de precipitações intensas, previsão de níveis de marés e avaliação dos níveis de alagamentos que poderão ocorrer para os diferentes cenários futuros de mudança do clima.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EMLURB (Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana de Recife) pelo fornecimento de informações técnicas e à FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pela concessão de bolsa de doutorado para o terceiro autor.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z. et al. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. **Nat Hazards**, v. 59, n. 3, p. 1753, 2011.
- 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, 2003, Anais do U.S. Geological Survey Subsidence Interest Group Conference. Texas: EUA, 2003. p. 63-70.
- CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. **Recife e a convivência com as águas**. In: HYDROAID (ITÁLIA); PMSS/MINISTÉRIO DAS CIDADES. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Brasília: Gráfica Brasil, 2005. p. 111-130.
- CABRAL, J. J. S. P. et al. **A Problemática da Drenagem Urbana em Áreas Planas Costeiras no Nordeste Brasileiro**. In: VILANUEVA, A.; GOLDENFUND, J.; SILVEIRA, A. Soluções para a drenagem urbana em países da América Latina. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 18-34.
- CARBONELL, A.; MEFFERT, D. J. **Climate Change and the Resilience of New Orleans: the Adaptation of Deltaic Urban Form**. In: URBAN RESEARCH SYMPOSIUM, 5, 2009, Anais do 5th Urban Research Symposium. França: World Bank, 2009. p. 1-39.
- CIRILO, J. A. et al. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.
- COSTA, M. B. S. F. et al. 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.
- COSTA, W. D.; SANTOS, A. C., COSTA FILHO, W. D. **O controle estrutural na formação dos aquíferos na planície do Recife**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, 1994, Anais do VIII Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas. Recife: ABAS, 1994. p. 38-43.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Sistema de Informações para a gestão territorial da região Metropolitana do Recife**. In: Projeto SINGRE. Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife. Recife: CPRM/FIDEM, 1994. 27p.

- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Sistema de Informações para a Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife**. In: Projeto SINGRE II. Atividades impactantes sobre o meio ambiente da Região Metropolitana do Recife. Recife: CPRM/FIDEM, 2001. 81p.
- DOMINGUEZ, J. M. L. et al. Geologia do Quaternário Costeiro do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 20, n. 1-4, p. 208-215, 1990.
- 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. Recife: ABF Engenharia e Prefeitura do Recife, 2016.
- FERRARIO, M. F. et al. Late Quaternary environmental evolution of the Como urban area (Northern Italy): A multidisciplinary tool for risk management and urban planning. **Engineering Geology**, v. 193, n. 2, p. 384-401, 2015.
- FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana do Recife**. Recife: ACQUA-PLAN/FIDEM, 1980.
- GIRÃO, G.; CORRÊA, A. C. B. A. Contribuição da Geomorfologia para o planejamento da Ocupação de Novas Áreas. **Revista de Geografia**, v. 21, n. 2, p. 36-58, 2004.
- GUSMÃO, A. D. **Mudanças Climáticas e Riscos Geológicos no Recife**, Palestra proferida no 9º Encontro do Comitê de Sustentabilidade e Mudanças Climáticas (Comclima), Recife, 2016.
- GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações do conhecimento geológico a prática da engenharia**. Recife: Ed. da UFPE, 2002.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa populacional do Recife em 2019**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 5 de nov. 2019.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **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. Geneva: IPCC, 2014.
- KIRSHEN, P. et al. **Adapting Urban Infrastructure to Climate Change: A Drainage Case Study**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 141, n. 4, p. 1-11, 2015.
- LIMA FILHO, M. F. et al. **Origem da Planície do Recife**. In: DGEO, Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte. Recife: SÉRIE B - Estudos e Pesquisas, 1991.
- LUNA, R. M. R. et al. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). **Natural Hazards**, v. 86, n. 3, p. 1363-1376, 2017.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica** (7ª Ed). São Paulo: Atlas, 2010.
- MIALL, A. D. **Principles of Sedimentary Basin Analysis** (2ª Ed.) Berlim: Springer, 1990.
- MIGUEZ, M. G. et al. **Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. In: NOBRE,

C.; YOUNG, A. Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas. Rio de Janeiro: INPE e Unicamp/NEPO, 2011. p. 123-144.

MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

NE 10 (2018). **Agamenon Magalhães receberá Faixa Azul até o fim do ano**. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2018/05/08/agamenon-magalhaes-recebera-faixa-azul-ate-o-fim-do-ano-338333.php>. Acessado em: 06 de maio de 2020.

OLIVEIRA, M. S. **Influência geológico-geotécnica na escolha dos tipos de fundações do bairro de Boa Viagem/Recife e elaboração de banco de dados de medições de recalques em edifícios**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018. 194 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**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016.

PEDROSA, F. J. A. **Aspectos da Evolução da Linha de Costa e da Paisagem Litorânea no Município de Olinda entre 1915 e 2004: Evidências do Tecnógeno em Pernambuco**. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. 194 p.

PERNAMBUCO, 2016. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br>. Acessado em: 12 dez. 2019.

PREFEITURA DO RECIFE (2016). **ESIG Consulta Drenagem Recife**. Disponível em: <https://esigportal.recife.pe.gov.br/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=759ef72eeac244fc822e618db0af235b>. Acessado em: 12 de novembro de 2019.

RECIFE. **Índice de Risco à Mudança do Clima em Recife-PE** (Relatório Final: Objetivo 1). Recife: Prefeitura do Recife, 2019.

SILVA, E. C. S. **Variabilidade Espaço-Temporal da Pluviosidade da Região Metropolitana de Recife**. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 116 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, T. L. V. et al. Ocean-atmosphere feedback during extreme rainfall events in Eastern Northeast Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, n. 5, p. 1211-1229, 2018.

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, n. 6, p. 2034-2053, 2016.

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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 19, p. 1-12, 2017.

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**, v. 37, n. 1, p. 222-240, 2020.

SOUZA, J. L.; CORRÊA, A. C. B.; SILVA, O. G. Compartimentação Geomorfológica da planície do Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista de Geografia**, v. 34, n. 1, p. 147-168, 2017.

SOUZA, J. L. **Morfodinâmica e Processos Superficiais das Unidades de Relevo da Planície do Recife**. Dissertação (Mestrado). Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. 162 p.

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.

WANDERLEY, L. S. A. et al. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149-164, 2018.

WANG, J. X. et al. Application of geo-environmental capacity of ground buildings in urban planning. **Environ Earth Sci**, v. 69, p. 93–102, 2013.