

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO



CRISTIANO SEABRA DE LIMA

Mapeamento de inundações de áreas urbanas no entorno do CELMM

Maceió

2017

CRISTIANO SEABRA DE LIMA

Mapeamento de inundações de áreas urbanas no entorno do CELMM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Maceió

2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

L732m Lima, Cristiano Seabra de.
Mapeamento de inundações de áreas urbanas no entorno do
CELMM / Cristiano Seabra de Lima. – 2017.
51f. : il. grafs.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Junior.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de
Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 58-51.

1. Estuário - Alagoas. 2. Inundações urbanas. 3. Complexo Estuarino
Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). 3. IPH-ECO. I. Título.

CDU: 628: 551.311.2



Folha de Aprovação

CRISTIANO SEABRA DE LIMA

Mapeamento de inundações de áreas urbanas no entorno do CELMM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Prof. Dr. Carlos Roberto Fragoso Júnior
(Orientador- PPGRHS)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador interno – PPGRHS-UFAL)

Prof. Dr. Valmir Albuquerque Pedrosa
(Examinador interno – PPGRHS-UFAL)

Prof. Dr. David Manuel Lelinho Motta Marques
(Examinador externo – IPH/UFRGS)

RESUMO

O aumento do nível médio do mar é um aspecto que tem chamado a atenção da comunidade científica e de cidades costeiras ao redor do mundo. O nível médio do mar de décadas mais recentes é dez vezes maior quando comparado com o dos milênios mais recentes. Isto impõe sérios desafios à população e aos ativos em zonas costeiras propensas a inundações no próximo século. Um aumento na frequência de inundações menores já é relatado em algumas regiões pelo mundo devido à redução do espaço entre referenciais de maré alta e elevação do solo. Estes transtornos de inundação, embora não sejam destrutivos, causam inconvenientes públicos, interrupções no comércio, perdas econômicas substanciais devido aos impactos de degradação da infraestrutura, além de causarem muitos prejuízos decorrentes do impacto socioeconômico e na saúde pública, através de doenças de veiculação hídrica. Neste estudo foram avaliados os efeitos da combinação entre projeções futuras de aumento do nível médio do mar de 3, 6 e 15 cm - associados a projeções de 10, 20 e 50 anos sugeridos pelo aumento global dos níveis do oceano - e com valores de vazões extremas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos. Os resultados no pior cenário de simulação (aumento do nível do mar de 15 cm e vazão com tempo de retorno de 100 anos) mostram profundidades que variam de 90 a 15 cm e podem chegar a 300 metros de extensão a partir das margens da laguna Mundaú. Este estudo mostrou também que pequenas inundações nestas regiões podem se tornar mais frequentes em 50 anos, caso ocorra uma vazão com tempo de retorno de 50 anos e caso se confirmem as previsões de aumento do nível médio global do mar de 15 cm associado à projeção de 50 anos.

Palavras-chave: IPH-ECO. Inundações. Estuário.

ABSTRACT

Mean sea level rise is an aspect that has drawn the attention of the scientific community and coastal cities around the world. The mean sea level of most recent decades is ten times greater when it is compared to the mean sea level of the most recent millennia. It brings serious challenges to the population and assets in flood-prone coastal zones over the next century. An increase in the frequency of minor flooding is already reported in some regions around the world due to the space between high tidal datums and land soil elevation. These nuisance flooding, although not destructive, cause public inconvenience, business interruption, substantial economic losses due to the infrastructure degradation impacts, in addition to causing many injuries due to the socio-economic impacts and public health, through of water-borne diseases. In this study were evaluated the effects of the combination between future projections of mean sea level rise of 3, 6 and 15 cm – associated with projection of 10, 20 and 50 years as suggested by global sea level rise – with extreme flow values associated with return time of 10, 50 and 100 years. The results on the worse simulation scenario (increasing of the sea level of 15 cm and flow with return time of 100 years) show depths that range from 90 to 15 cm and can achieve until 300 meters from the margins of the Mundaú lagoon. This study also showed that minor floods in these sites may become more frequent in 50 years, if global mean sea level rise of 15 cm associated with projections from 50 years forecasts are reached.

Key-words: IPH-ECO. Floods. Estuarine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de representação de transtornos de inundação	13
Figura 2 – Demonstração de atividades econômicas no CELMM.	18
Figura 3 – Demonstração de processo erosivo da água no tempo sobre infraestrutura urbana: trecho 1	19
Figura 4 – Demonstração de processo erosivo da água no tempo sobre infraestrutura urbana: trecho 2	20
Figura 5 – Localização da bacia do rio Paraíba e da bacia do rio Mundaú	21
Figura 6 – Características topográficas da Bacia do rio Paraíba e da Bacia do rio Mundaú .	21
Figura 7 – Demonstração da construção dos dados de vazão para entrada do modelo. . . .	25
Figura 8 – Limites de atuação da modelagem do nível superficial de água	26
Figura 9 – Régua de referências de conversão do datum do IBGE para o referencial da DHN de 2012	27
Figura 10 – Esquema da sequência de atividades realizadas no processo de geração dos valores de áreas inundadas	28
Figura 11 – Regressão linear entre os níveis de água calculados e observados da laguna Mundaú.	30
Figura 12 – Comparação entre os valores de nível de água observados e simulados na laguna Mundaú	30
Figura 13 – Gráfico com percentual de áreas inundadas a partir das simulações	32
Figura 14 – Aumento percentual de áreas inundadas em relação ao cenário de referência . .	33
Figura 15 – Manchas de áreas inundadas na cidade de Maceió	35
Figura 16 – Mancha de inundação simulada e densidade demográfica	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Criação dos cenários a partir dos tempos de retorno e projeções futuras de maré	27
Tabela 2 – Total em percentual de áreas inundadas em cada simulação.	31
Tabela 3 – Dados censitário dos setores	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM - Aumento do nível do mar

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

RN - Referência de Nível

CELMM - Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba

Δ ms - Incremento de maré de sizígia

Tr - Tempo de retorno

MDT - Modelo Digital do Terreno

TIN - Triangulated Irregular Network

IDW - Inverse Distance Weighting

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS E METAS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Transtornos de inundações	13
3.2	Aumento do nível do mar	14
3.3	Impactos socioeconômicos	15
3.4	Urbanização em áreas costeiras	15
4	METODOLOGIA	16
4.1	Área de estudo	16
4.2	IPH-ECO	19
4.2.1	Informações gerais	19
4.2.2	Dados de entrada do modelo	20
4.2.3	Módulo hidrodinâmico: velocidade e superfície de elevação	21
4.3	Calibração e validação do Modelo	23
4.4	Dados de marégrafos e projeções de aumento de nível do mar	24
4.5	Dados de vazões extremas	24
4.6	Dados de batimetria	25
4.7	Definição dos limites de simulação, cenários de simulação e dados topográficos	25
4.8	Análise das áreas inundadas	28
4.9	Limitações e considerações	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Calibração e validação do modelo	29
5.2	Análise relativa de percentual de áreas inundadas	30
5.3	Descrição e análise dos mapas de inundação em Maceió	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O aumento do nível do mar é um aspecto bem documentado e urgente do aquecimento global antropogênico. Estima-se que, em 2050, este fenômeno poderá causar danos de mais de 1 trilhão de dólares em ativos que se encontram em uma linha de menos de 1 metro acima do nível do mar atual (MOFTAKHARI et al., 2015). Neste mesmo ano, é previsto que 25% da população mundial viverá em zonas costeiras propensas a inundações (AERTS et al., 2014).

Sobre o comportamento desse evento, dados confiáveis de nível de água superficial do oceano, registrados em marégrafos com mais de 100 anos ao redor do mundo, mostram uma aceleração global significativa no aumento médio do nível do mar de $0,009 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-2}$ desde 1880, e uma ascensão média do nível médio do mar de $2,8 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ entre 1993 e 2014 (CHURCH; WHITE, 2011). Contudo, registros de altimetria sugerem uma taxa do aumento do nível do mar de $3,3 \pm 0,4 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ no mesmo período (CAZENAVE et al., 2014).

Sabe-se ainda que a taxa de aumento do nível do mar em décadas passadas é de uma ordem de magnitude maior que o aumento do nível do oceano sobre o milênio passado (MILNE et al., 2009), e que o crescimento do nível global do mar é espacialmente distribuído por processos dinâmicos direcionados pelo clima e processos de equilíbrio estático como a circulação costeira e oceânica (JR; DORAN; HOWD, 2012).

Esse aumento entre taxas de nível do mar milenar e decadais mais recentes reflete no aumento do nível médio local do oceano, que reduz a lacuna entre maré alta e a fase de inundação. Com isso, tornam-se mais frequentes os transtornos menores relacionados com marés de inundação e níveis prejudiciais. Assim, níveis de inundação do século atual podem tornar-se decadais em 2050. (TEBALDI; STRAUSS; ZERVAS, 2012; WAHL; CHAMBERS, 2015).

O termo *transtornos de inundação* é relativamente novo e descreve inundações que não são destrutivas, mas que são capazes de causar impactos socioeconômicos substancialmente negativos. Isto compromete infraestruturas como transportes de superfície e sistemas de esgoto e impõe riscos à saúde pública (MOFTAKHARI et al., 2015). Várias cidades brasileiras vêm sofrendo com problemas na infraestrutura de drenagem urbana, causadas por inundações, e com suas consequências na saúde pública e na economia (TUCCI, 2002).

Num cenário futuro, com a expansão contínua das cidades localizadas em rios com planícies inundáveis e em deltas costeiros decorrentes do crescimento e migração populacional, espera-se um aumento importante no risco de inundações nas próximas décadas. Além disso, simulações baseadas em cenários usando modelos climáticos indicam a possibilidade de aumento de risco de inundação futura em muitas regiões devido às mudanças climáticas, embora exista considerável variabilidade entre modelo e realidade. (SAMPSON et al., 2015)

Estudos prévios sobre impactos socioeconômicos de inundações costeiras futuras têm focado primeiramente em cotas de inundação extrema (HALLEGATTE et al., 2013; HINKEL et al., 2014).

Contudo, estudos mais recentes abordam os transtornos de inundação de baixa magnitude, mas que podem causar impactos negativos relevantes, considerando o aumento nível do mar e eventos de chuva (MOFTAKHARI et al., 2015). Em regiões de deltas de rios ou de estuários em que existem áreas urbanas com cotas próximas ao nível do mar, como no Complexo Estuarino Mundaú-Manguaba (CELMM), no estado de Alagoas, não somente a maré influenciará nos transtornos que este tipo de inundação pode causar na infraestrutura urbana, mas também os eventos de vazões extremas.

O CELMM é um sistema de relevante importância para a populações que dependem da pesca como meio fundamental de subsistência. Por serem populações carentes, são altamente vulneráveis a risco naturais como inundações. Muitas regiões do seu entorno são altamente propensas a inundações e já sofrem com problemas de drenagem, devido às baixas declividades e valores e baixos valores de elevação de terreno. Um aumento na frequência de inundações menores já é relatado em algumas regiões pelo mundo devido à redução entre o espaço de elevação de maré alta e a elevação do solo. Estes transtornos de inundação, embora não sejam destrutivos, causam inconvenientes públicos, interrupções no comércio, perdas econômicas substanciais devido aos impactos de degradação da infraestrutura, além de causarem muitos prejuízos na saúde pública, através de doenças de veiculação hídrica.

Diante disso, este estudo, que está inserido no projeto Produtos e Processos - Modelagem Ecológica de Ecossistemas Aquáticos: Estrutura, Funcionamento e Previsão em Lagoas Costeiras, financiado pela Finep, pretende prever e mapear o comportamento do nível da água em áreas urbanas suscetíveis à inundação, no entorno do CELMM, a partir da combinação entre cenários futuros de aumento do nível de mar e de vazões extremas. Serão utilizados dados de vazão na foz dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, afluentes ao complexo estuarino, dados de marés de sizígia e de elevação da área estudada. Para a simulação do comportamento do nível de água, será utilizado o módulo hidrodinâmico, com descrição tridimensional, do modelo IPH-ECO e software de geoprocessamento.

2 OBJETIVOS E METAS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento dos níveis superficiais de água nas áreas urbanas mais suscetíveis a inundações no entorno do CELMM, através de um modelo hidrodinâmico.

2.2 Objetivos específicos

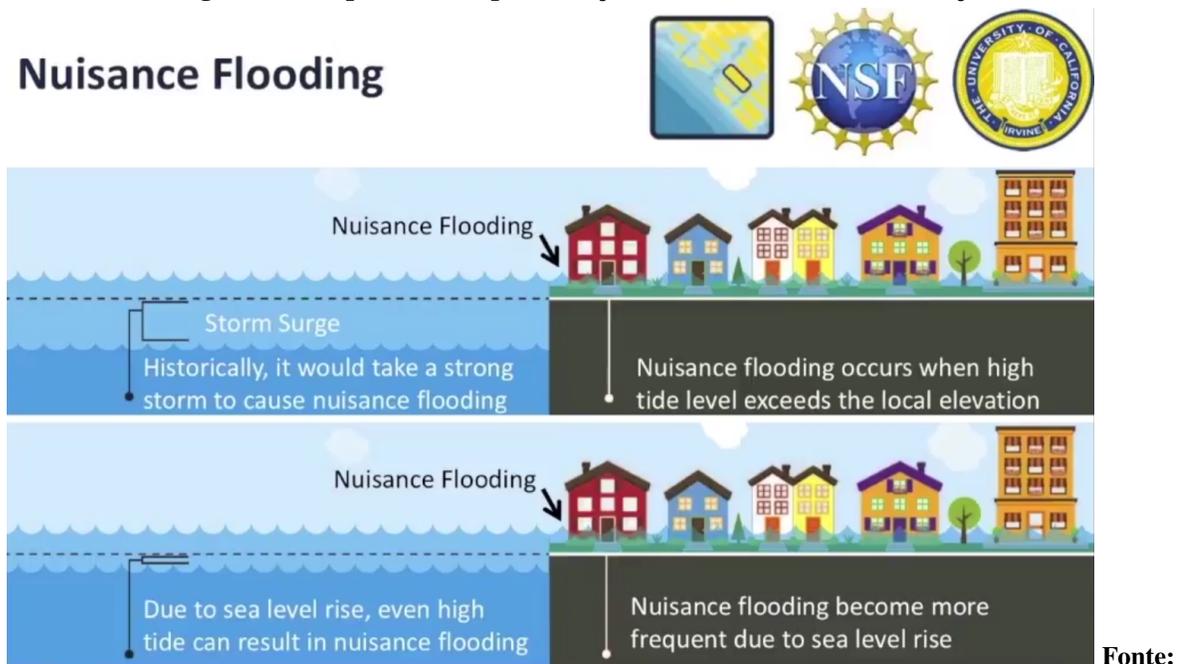
- a) Analisar o comportamento dos níveis superficiais de água para os diferentes cenários de simulação através da análise de percentual relativo de áreas inundadas;
- b) Analisar o cenário de simulação mais crítico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Transtornos de inundações

O termo *transtornos de inundação* é relativamente novo e descreve eventos de inundações pequenas e não destrutivas em áreas costeiras dominadas pelos limites do nível do mar, em que o nível da água excede a elevação local e acontece a inundação, que embora seja menor ocorre com uma maior frequência. Isto pode ser causado por marés altas, tempestades (ondas) ou uma combinação das duas. Qual a conexão com o aumento do nível do mar? Se o nível do mar é baixo, então é necessário uma maior tempestade, ou a combinação de uma tempestade e uma maré alta, para exceder o limite local de inundação. Porém, se o nível do mar é alto, então existe uma borda limite menor entre o nível atual e a terra (Figura 1). Assim, não é necessário uma grande tempestade ou uma grande onda para causar uma inundação costeira, de modo que até mesmo marés altas podem causar inundações locais (MOFTAKHARI et al., 2015).

Figura 1 – Esquema de representação de transtornos de inundação.



Adaptado de Amir Aghakouchak (2017).

Até o final do século XX já se previam taxas de aumentos do nível do mar entre duas e cinco vezes maiores que as já estabelecidas, e que essas taxas poderiam levar a episódios de inundações de regiões costeiras muito baixas e agravamento da erosão em praias (IPCC, 1996).

Embora estas inundações sejam pequenas, elas são capazes de causar impactos socioeconômicos substancialmente negativos. Isto compromete infraestruturas como transportes de superfície e sistemas de esgoto, causa interrupção de negócios e impõe riscos à saúde pública (MOF-

TAKHARI et al., 2015). Várias cidades brasileiras vêm sofrendo com problemas na infraestrutura de drenagem urbana, causadas por inundações, e com suas consequências na saúde pública e na economia (TUCCI, 2002).

A ocupação humana em áreas próximas a corpos hídricos é a razão para a decorrência dos impactos causados por fenômenos naturais, como inundações (ARMCANZ, 2000). Este fato surge da evolução histórica do uso de corpos hídricos como meio de sustento para sobrevivência.

Em geral, as cidades de países em desenvolvimento são relativamente mais vulneráveis em relação a perdas anuais médias na economia. Por outro lado, esforços de gerenciamento de riscos tendem a ser menores. No futuro haverá mais exposição de inundações nas cidades costeiras devido ao crescimento populacional e de ativos, e às mudanças climáticas. Contudo, quando não são adotadas medidas de proteção suficientes, as cidades são afetadas por pequenas inundações em uma base frequente (MERRIFIELD et al., 2013).

Com as mudanças climáticas, as proteções contra inundações presentes deverão ser melhoradas para evitar perdas que podem ter custos muito mais elevadas que os custos das obras. Outra perspectiva é que, mesmo com as melhores medidas de proteção, cada inundação tende a ser mais destrutiva devido ao aumento do nível do mar (HALLEGATTE et al., 2013). Além disso, a frequência das inundações pode expor a infraestrutura a um estresse contínuo, o que implica na aceleração do seu processo de envelhecimento (MERRIFIELD et al., 2013).

3.2 Aumento do nível do mar

O nível do mar é amplamente utilizado como indicador da variabilidade e de mudanças climáticas sobre longas séries de tempo e espaço. O nível médio global do mar fornece uma medida de trocas de volumes associados com mudanças na capacidade de retenção de calor do oceano e trocas de massa de água com a terra. Desse modo, a mudança do nível do mar não é apenas um indicador climático chave, mas é também potencialmente um dos mais importantes impactos das mudanças climáticas (MERRIFIELD et al., 2012).

A antecipação dessas mudanças amplificarão grandemente os riscos às populações costeiras, que vêm aumentando significativamente nos últimos tempos (SMALL, 2000). É previsto que o aumento do nível do mar poderá causar prejuízos da ordem de trilhões de dólares em ativos situados em uma linha de até 1 metro acima do nível do mar em 2050 (MOFTAKHARI et al., 2015), e que, neste mesmo ano, a densidade populacional em zonas costeiras propensas a inundações chegará a 25%. A vulnerabilidade de cidades costeiras aos impactos ligados ao aumento do nível do mar tem sido registrada por meio do acontecimento de desastres recentes ligados às inundações em países como os Estados Unidos (2005, 2008, 2012), Filipinas (2012, 2103) e Grã-Bretanha (2014) (AERTS et al., 2014).

A reconstrução do nível global do mar usando dados de marégrafos de 1950 a 2000 indicou um aumento na taxa de crescimento após 1993 e outros períodos de rápido crescimento do nível do

mar, mas nenhuma aceleração significativo sobre esse período. Com a extensão da reconstrução do nível global médio do mar de volta a 1870, foi detectado um acréscimo de 195 mm entre 1870 e 2004, a uma taxa de crescimento do nível do mar de $1,7 \pm 0,03 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ no século XX e uma aceleração significativa de crescimento do nível do mar de $0,013 \pm 0,006 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-2}$ (CHURCH; WHITE, 2006).

Estudos mais recentes mostraram que, entre 1993 e 2009, a taxa de aumento do nível médio global do mar a partir de dados confiáveis de marégrafos com mais de 100 anos foi de $2,8 \pm 0,08 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Entre 1880 e 1900, o aumento do nível médio global do mar foi de 210 mm e a aceleração foi de $0,009 \pm 0,003 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ (CHURCH; WHITE, 2011). Mais recentemente, Cazenave et al. (2014) citou um aumento no nível do mar de $3,3 \pm 0,4 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ entre 1993 e 2014, a partir de registros altimétricos.

3.3 Impactos socioeconômicos

Impactos socioeconômicos de inundação costeira incluem os impactos imediatos para a população e seus bens pessoais e imóveis, assim como efeitos de longo prazo sobre a infraestrutura crucial, incluindo as que são designadas para evitar, mitigar ou reduzir os perigos de inundações futuras, e sobre a saúde pública, que é uma área pouco estudada.

Os impactos socioeconômicos são habitualmente categorizados em quatro tipologias: 1 - impactos para as populações vulneráveis que tem maior probabilidade de sofrer as maiores e mais irreparáveis perdas em virtude de fatores como a vulnerabilidade social; 2 - a habilidade de uma comunidade costeira se recuperar devido aos efeitos sobre infraestruturas importantes como sistemas de serviços e de suprimento de água, transporte, energia, comunicação, hospitais, escolas, portos marinhos e pontes; 3 - impactos sobre capital social significativo, a habilidade de uma comunidade se recuperar através de investimento na reconstrução e recuperação de perdas como fatores de capacidade de governança, estrutura financeira e disponibilidade de trabalhadores; 4 - impactos de longo período sobre recursos de comunidades costeiras gastos para mitigar ou evitar futuros danos de inundações como elevação ou estruturas contra inundações, ou adquirindo e relocando estas áreas em áreas perigosas para habitação, e a construção de diques, represas e paredes de proteção contra ondas (MOFTAKHARI et al., 2015).

3.4 Urbanização em áreas costeiras

Todos os anos, inúmeras pessoas em todo o mundo são sujeitas a inundações costeiras e de sistemas fluviais, que são os riscos naturais mais significantes a que a sociedade moderna está sujeita (UNISDR, 2009). A população total e o valor econômico dos bens ativos localizados em zonas propensas a inundações cresceu bruscamente sobre as últimas décadas e são esperadas aumentos devido ao crescimento geral populacional e da riqueza, porém maiores perdas são previstas devido aos aumentos no nível do mar e frequências de inundações em razão das mudanças climáticas (IPCC,

2007).

Jongman, Ward e Aerts (2012) conseguiram demonstrar que, num período entre 1970 e 2010, 95% a mais da população global foi afetada por pelo menos um evento de inundação em um período de 100 anos, somente em zonas costeiras. O crescimento populacional em zonas costeiras propensas a inundações já é maior que o crescimento médio populacional, como relatam (SMALL; NICHOLLS, 2003). Afirmam também que, na maioria dos casos, o número absoluto da população e a densidade populacional ambas decrescem com a elevação e com a distância a partir linha limite da zona costeira.

A partir desse ponto de vista, Kron et al. (2012) define como risco de inundação aquele que é o produto de risco (a chance e as características de um evento de inundação ocorrer), a exposição (a população e os bens ativos sujeitos a inundações) e vulnerabilidade (capacidade de uma sociedade lidar com o evento)

No entorno do CELLM, o crescimento populacional foi mostrado pela evolução da taxa de urbanização dos sete municípios que o cercam, nos anos de 1970, 1980, 1991, 1996 e 2000. Este valores, originados dos Censos Demográficos do IBGE, são mostrados no resumo executivo do Plano de Ações e Gestão Integrada do CELMM (Agência Nacional de Águas, 2006) e corroboram com os estudos anteriormente citados.

4 METODOLOGIA

Um conjunto de dez cenários, levando em consideração as mudanças climáticas, foi criado para investigar os impactos do aumento do nível do mar em algumas localidades situadas no entorno do CELMM. Aumentos relativos de inundações costeiras foram calculados usando o módulo hidrodinâmico do modelo IPH-ECO. Para isto, foi utilizado um conjunto de dados relevantes de observações dos níveis superficiais de água e de informações recentes da batimetria do CELMM e vazões observadas afluentes a esse sistema, de vazões extremas associadas a tempos de retorno calculadas através de funções estatísticas, de modelo digital do terreno, medições manuais de topografia e de fotografias aéreas de alta resolução.

4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende regiões urbanizadas de baixos valores de cota topográfica contíguas ao Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELLM), nas cidades de Pilar, Marechal Deodoro, Santa Luzia do Norte, Coqueiro Seco e Maceió. As cidades de Rio Largo e Satuba não foram abarcadas neste estudo, pois não estão situadas nas margens das lagunas. O sistema de lagunas está situado no estado de Alagoas entre as latitudes 9°35' e 9°46'sul e longitude 35°44' e 35°58' oeste.

O clima predominante desse sistema é o tropical semiúmido com estações bem marcadas, sendo úmido entre os meses de abril e agosto e seco entre os meses de setembro e março. As

marés são semidiurnas com amplitude aproximada de 1,44 m, porém o efeito dessa variação é bastante reduzido no interior das lagoas, principalmente na Manguaba. Por esse motivo, a laguna Mundaú é mais influenciada pelas correntes de maré e tem um menor tempo de renovação das águas (cerca de 2 semanas) que o da Manguaba (2 meses), que praticamente não recebe aporte de água salgada (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

Em relação à gestão da bacia hidrográfica do CELMM, o Plano de Ações e Gestão Integrada de 1998 recomendou a criação de um comitê para o seu gerenciamento. Porém, só em 2006 isso foi feito. Essa lacuna institucional foi responsável por ações e projetos efetuados de modo descontínuo e desarticulado, sem a devida efetividade e eficácia. O resultado disso foi que, nos últimos anos, os problemas se agravaram e as condições ambientais tornaram-se bastante críticas, levando o CELMM ao limite de sua sustentabilidade (Agência Nacional de Águas, 2006).

Em 28 de Dezembro de 2006, foi criado o Comitê de Bacia da Região Hidrográfica do CELMM, que constitui 28 membros, área de 3.151 km², com 12 municípios e uma população de 1.228.773 habitantes, cujos municípios integrantes dessa bacia são: Atalaia, Barra de São Miguel, Boca da Mata, Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Maribondo, Pilar, Rio Largo, Santa Luzia do Norte, São Miguel dos Campos, Satuba (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos, 2017).

Em relação à demografia dos municípios que compõem o CELMM, uma evolução na taxa de urbanização dos municípios que compõem esse sistema indica um crescimento populacional. Fatores como a modernização da agricultura do Pólo Sucroalcooleiro, concentrações de terras e melhores oportunidades de emprego nos centros urbanos ocorridos na última década são responsáveis pelo aumento da taxa de urbanização no entorno do CELMM. Acredita-se que o aumento da migração campo-cidade também aumentou a concentração populacional nos núcleos urbanos, reduzindo as taxas de crescimento da população rural (Agência Nacional de Águas, 2006).

Esse aumento da população residente em zonas costeiras do entorno do CELMM é um fator que pode agravar os impactos sociais e econômicos. Esses impactos tornam-se mais ou menos significativos a depender do nível de vulnerabilidade da população exposta. Trata-se, portanto, de um fator potencializante dos efeitos de inundações frequentes, tendo em vista que o entorno do CELMM envolve majoritariamente uma população carente.

Ao redor do CELMM há diversos tipos de atividades comerciais ligadas a restaurantes, hotelaria, artesanato e atividades turísticas que podem sofrer sérios prejuízos econômicos (Figura 2). As inundações frequentes, irão agravar os problemas na drenagem do local e degradação da infraestrutura urbana. Nesse sentido, Hallegatte et al. (2013) afirma que para evitar um aumento no risco de inundação, é necessário uma adaptação na política para reduzir a probabilidade de inundação abaixo dos valores atuais.

Nas imagens da Figura 3 (a) e (b), e Figura 4 (a) e (b), é possível observar um exemplo de

Figura 2 – Demonstração atividades econômicas que podem ser afetadas pelas inundações frequentes no CELMM, no bairro do Pontal da Barra.



Fonte: Autor (2017).

dano estrutural de infraestrutura urbana pela ação erosiva da água, no CELMM, em dois pontos na rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra em Maceió. Embora não existam registros de inundações nestes pontos específicos, a evolução do processo erosivo fica evidente quando se comparam as imagens de 2012 e de 2017.

Percebe-se que houve uma tentativa de proteger essa estrutura dos efeitos erosivos das ondas com a implantação de um enrocamento nas margens da via de acesso. Porém, a via está perdendo espaço pela ação erosiva da água em um intervalo curto de tempo de 5 anos. Com isso, fica evidente que medidas de proteção de curto prazo podem não ser mais tão eficazes.

A laguna Mundaú, com área de 27 km², recebe o escoamento da bacia do rio Mundaú (Figura 5), com área de drenagem de cerca de 4.126 km², tempo de concentração de 1,53 dias e elevação de terreno variando de cerca de 2 a 1.016 metros da foz do rio Mundaú ao ponto mais elevado dessa bacia (Figura 6). Contém em si 30 municípios e está situada entre os estados de Pernambuco e Alagoas. Dessa área, aproximadamente 2.155 km² está localizada na Mesorregião do Agreste e Pernambuco, em que 15 municípios estão contidos total ou parcialmente. Essa área corresponde a cerca de 52% da área total.

Em Alagoas, a área da bacia do rio Mundaú corresponde a 1.971 km² (cerca de 48% da área total) e está localizada na Mesorregião do Leste Alagoano contendo, total ou parcialmente, 15 municípios (Figura 5). A classificação de Köppen define o clima desta bacia como sendo do tipo Bsh, com precipitação anual média em torno de 800 mm e temperatura média anual superior a 18 °C (CONSULTORIA TÉCNICA LTDA, 1999).

A laguna Manguaba, com área de 42 km², recebe o aporte dos rios Paraíba do Meio, com bacias de drenagem de 3.330 km² e 20 municípios, e Sumaúma, com 406 km² de bacias de drenagem e 3 municípios (Figura 5). O tempo de concentração dessa bacia é de 1,34 dias e a elevação do terreno varia de cerca de 0 a 941 metros da foz do rio Paraíba do Meio ao ponto mais elevado dessa bacia (Figura 6).

O clima dessa bacia na parte alagoana é, pela classificação de Kopp et al. (2016), tropical quente e chuvoso com verão seco do tipo As'. A estação chuvosa ocorre de abril a junho e a

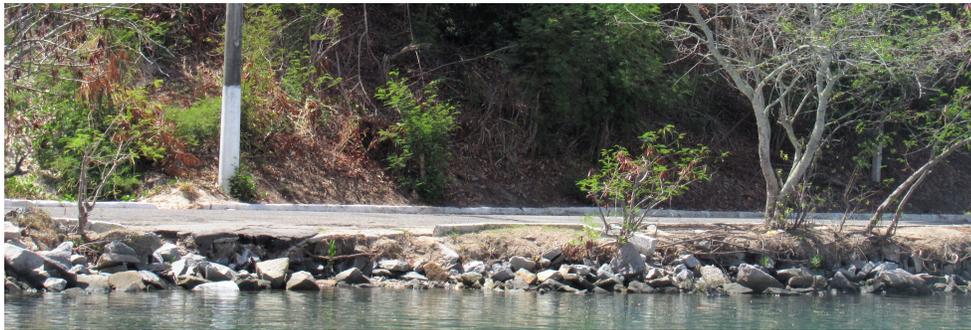
Figura 3 – Demonstração de processo erosivo da água sobre infraestrutura urbana: trecho 1 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra. Comparação entre as imagens de 2012 e 2017.

(a) Trecho 1 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra - Imagem de 2012.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

(b) Trecho 1 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra - Imagem de 2017.



Fonte: Autor (2017)

pluviosidade média anual é de 1.600 mm, de acordo com a SUDENE e o DENAEE, nos municípios de Pilar, Atalaia, Capela, Mar Vermelho, Palmeira dos Índios, Pindoba, Quebrangulo e Viçosa. A temperatura média anual é de cerca de 25 °C média mensal que chega a atingir 30 °C, com meses mais quentes em dezembro e fevereiro e mais frio usualmente em julho. No território de Pernambuco, Kopp et al. (2016) classifica o clima como subsumido, com curto período chuvoso (outono - inverno, correspondendo aos meses de março a setembro), do tipo BShs' (GAMA, 2011).

4.2 IPH-ECO

4.2.1 Informações gerais

O modelo IPH-ECO é um sistema computacional, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), que objetiva o entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos em corpos hídricos como estuários, lagos e reservatórios. Esse modelo ecológico dinâmico tridimensional de grade estruturada possui um módulo hidrodinâmico vinculado a um ecológico, que representa os processos químicos e biológicos (MARQUES et al., 2012).

Figura 4 – Demonstração de processo erosivo da água sobre infraestrutura urbana: trecho 2 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra. Comparação entre as imagens de 2012 e 2017.

(a) Trecho 2 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra - Imagem de 2012.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

(b) Trecho 2 da rua Alípio Barbosa da Silva, no bairro do Pontal da Barra - Imagem de 2017.



Fonte: Autor (2017)

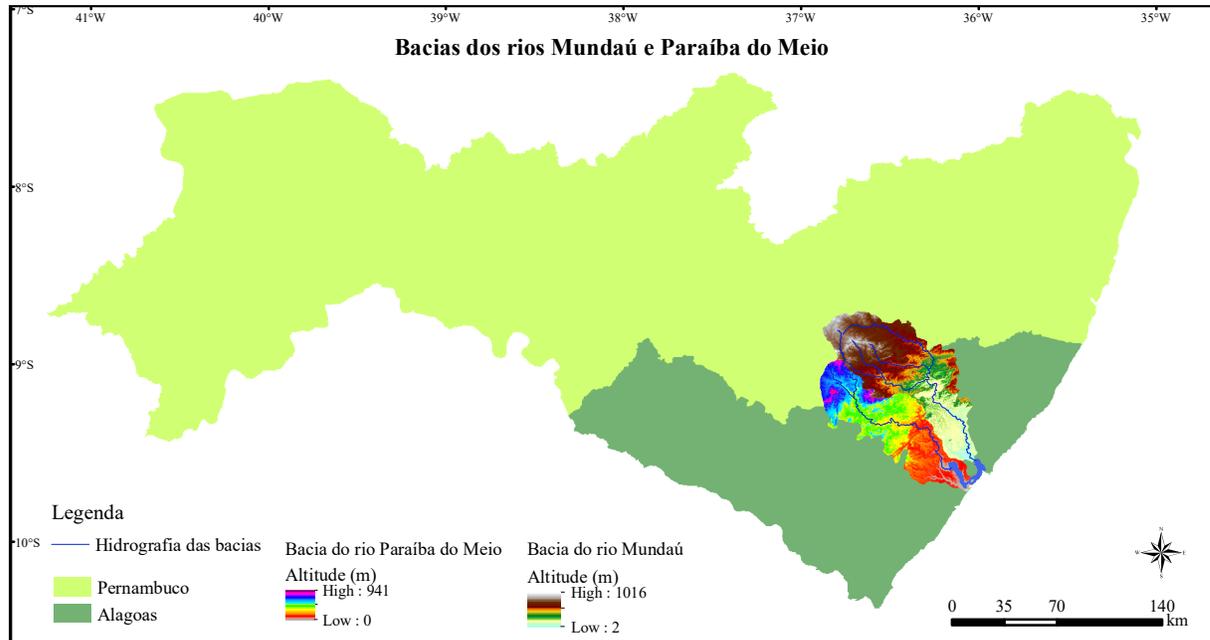
Este sistema pode abranger três dimensões de ecossistemas aquáticos, assim como pode ser usado em dimensão zero (modelo concentrado), em uma ou duas dimensões, podendo ser aplicado em ecossistemas aquáticos continentais e costeiros. O modelo possui um módulo para elementos na coluna d'água e outro para elementos no sedimento. Utiliza grades ortogonais estruturadas e não estruturadas.

4.2.2 Dados de entrada do modelo

O módulo hidrodinâmico que compõem o modelo IPH-ECO utiliza como dados de entrada: a batimetria e o coeficiente de Chezy, na grade; os processos, parâmetros, condições iniciais e de contorno, no módulo hidrodinâmico. As entradas de vazão e de maré no sistema, que são as condições de contorno do modelo, definidas na construção dos cenários.

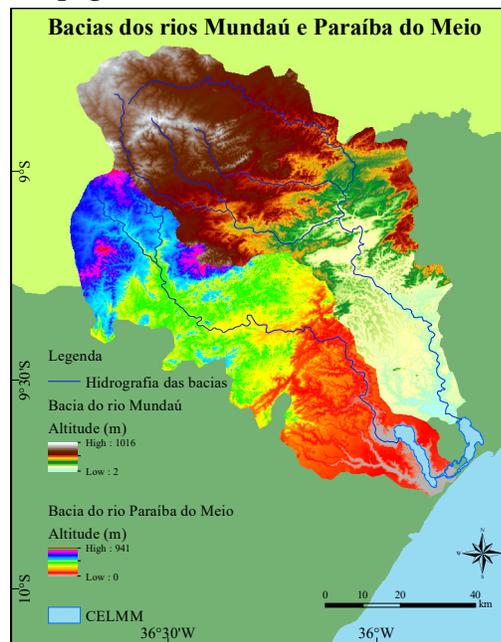
No módulo de dados meteorológicos são inseridos dados de meteorologia julgados necessários.

Figura 5 – Localização das bacias dos rios Paraíba do Meio e Mundaú entre os estados de Alagoas e Pernambuco.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2017).

Figura 6 – Características topográficas da Bacia do rio Paraíba e da Bacia do rio Mundaú.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2017).

4.2.3 Módulo hidrodinâmico: velocidade e superfície de elevação

O módulo hidrodinâmico do modelo IPH-ECO (FRAGOSO et al., 2009) visa à representação das variáveis velocidade e superfície de elevação da água em três dimensões. Este módulo é uma

adaptação do modelo TRIM3D criado por Casulli e Cheng (1992) e consiste em um modelo de diferenças finitas que emprega o esquema semi-implícito para a solução das equações de hidrodinâmica de águas através de uma abordagem mista Euleriana-Lagrangiana para os termos convectivos.

As equações de Navier-Stokes para escoamento turbulento dão origem às equações do módulo hidrodinâmico, que são baseadas na conservação de massa e de quantidade de movimento em três dimensões. Elas supõem que: a pressão é hidrostática, o fluido é incompressível e que não há estratificação de densidade ao longo da coluna d'água.

Equação da conservação de massa na forma diferencial:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \eta) u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \eta) v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento na forma diferencial:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f v \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + f u \quad (4)$$

onde t é o tempo; u , v e w são as componentes da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente; η é elevação da superfície da água medida a partir de um nível de referência; μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica horizontal; h é a profundidade medida a partir de um nível de referência; g é a aceleração da gravidade; f é o parâmetro de Coriolis.

As tensões de cisalhamento (τ_x^w , τ_y^w) provocadas pelo vento regulam as condições de contorno na superfície livre:

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x^w, \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y^w, \quad (5)$$

A tensão de cisalhamento no fundo através da fórmula de Manning-Chezy regulam as condições de contorno na interface água-sedimento:

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma u, \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma v \quad (6)$$

em que γ é coeficiente de fricção junto ao fundo, podendo ser escrito como:

$$\gamma = \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} \quad (7)$$

onde $H = h + \eta$ é a profundidade total; e C_z é o coeficiente de atrito de Chezy.

4.3 Calibração e validação do Modelo

A calibração do modelo consistiu em uma simulação hidrodinâmica no período entre 13 de fevereiro a 14 de março de 2014, que condiz com o período em que os dados de nível de água foram observados na laguna Mundaú. O passo de tempo numérico foi definido em 30 segundos. Como condição inicial do modelo, definiu-se o valor de superfície livre inicial como sendo o menor valor observado de nível de água na laguna Mundaú situado no início do conjunto de dados.

Esse valor ocorreu às 9 horas na série de dados observados e para o cenário de referência foi de 0,302 m. Para projeções de marés futuras de aumento do nível médio do mar, esse valor foi somado aos incrementos de 3 cm (0,332 m), 6 cm (0,362 m) e 15 cm (0,452 m). Isso foi feito para garantir que não fossem ultrapassados os valores das cotas topográficas nas margens das laguna durante os primeiros valores simulados, já que em alguns pontos essas cotas são muito baixas.

Os valores utilizados para projeções de marés futuras são sugeridos por Merrifield et al. (2013) e estão associado a projeções futuras de aumento do nível médio do mar de 3, 6 e 15 cm associados a projeções de 10, 20 e 50 anos sugeridos pelo aumento global dos níveis do oceano. O valor de atrito no fundo foi determinado pelo coeficiente de Chézy de $46 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ através do processo de calibração. Para a discretização do CELMM com a extensão de atuação do modelo foram utilizados elementos quadrados tendo um comprimento lateral de 50 m. O projeto utilizado nesse estudo para a realização das simulações foi calibrado, validado e cedido por BRITO e Fragoso (2017).

Foi utilizado o método da tentativa e erro para a calibração do modelo, que utilizou o Coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe (R^2) como função objetivo (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Nesta função, privilegia-se a comparação de valores com a média dos valores observados (Equação 8). Empregou-se também o erro médio padrão (RMSE) como função objetivo, que dá um peso maior aos valores de maior magnitude (Equação 9).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{Obs}(t) - Y_{Calc}(t))^2}{\sum(Y_{Obs}(t) - \bar{Y}_{Obs}(t))^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_{Obs}(t) - Y_{Calc}(t))^2}{N}} \quad (9)$$

4.4 Dados de marégrafos e projeções de aumento de nível do mar

Os dados de nível de água nas lagunas foram obtidos através de um medidor de nível de água (In-Situ Aqua Troll 200), que foi instalado na laguna Mundaú com frequência de amostragem de dados a cada 15 minutos entre os dias 13 de fevereiro e 14 de março no ano de 2014. Estas informações correspondem a um total de 28 dias e aproximadamente 52 ciclos de maré. Os valores observados mostraram uma importante variação na amplitude com 20 cm nas marés de quadratura e 40 cm nas marés de sizígia, que foram utilizadas na validação do modelo hidrodinâmico. Neste estudo utilizou-se a maré de sizígia com intervalo de tempo horário.

Foram construídos nove cenários a partir da combinação de marés de sizígia com incrementos (Δms) de 3, 6 e 15 cm e três valores de vazões extremas. Estes acréscimos são relativos à projeção de marés associados a 10, 20 e 50 anos de aumento do nível do mar global, proposto por Merrifield et al. (2012).

4.5 Dados de vazões extremas

Para estimar as vazões extremas com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos foram utilizadas séries temporais de dados de vazão dos rios afluentes ao CELMM. Estes dados são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Para obter as vazões correspondentes à foz de cada rio, foram calculados fatores de correção de vazão a partir da razão entre a área de drenagem a partir da foz da bacia e a área de drenagem do posto, em cada bacia hidrográfica. Os fatores de correção para os rios Paraíba do Meio e Mundaú são 1,43 e 1,16, nesta ordem (SOUZA; Comunicação pessoal, 2017).

Os testes de Kolmogorov-Smirnov foram aplicados às séries de vazões anuais dos rios Mundaú e Paraíba do Meio para testar a aderência do ajuste de distribuições estatísticas a esses valores de vazões. Os resultados mostraram que houve boa aderência da distribuição GEV (Generalized Extreme Value) com valor de significância $p < 0,05$. A partir disso, foi utilizada essa distribuição para estimar as vazões máximas na foz dos referidos rios.

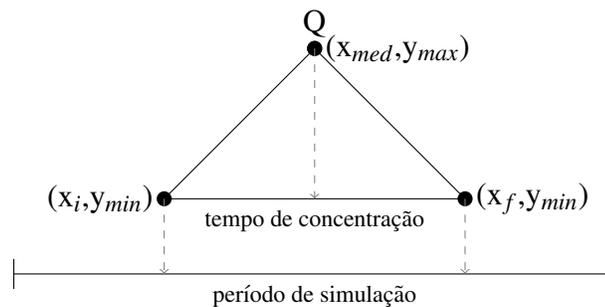
A série de vazões extremas do rio Paraíba do Meio compreende 28 anos de registros de 1978 a 1987, 1990, e de 1993 a 2010. Estes registros são originados na estação Atalaia, com código 39870000, localizada no município de Atalaia, no estado de Alagoas. Para estimar as vazões máximas neste rio, foi utilizada uma distribuição GEV, amplamente aplicada na estimativa de valores extremos máximos. Desse modo, as vazões, na foz, com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos foram 635,65 m³/s, 847,15 m³/s e 905,59 m³/s, respectivamente.

A série de vazões extremas do rio Mundaú corresponde a 36 anos de registro entre 1974 e 2016, sendo excluídos aqueles dos anos 1989, 2004, 2008, 2010, 2013 e 2015 em razão do número considerável de falhas. Estas vazões são da estação Fazenda Boa Fortuna, com código 3977000, situada na cidade de Rio Largo, Alagoas. Os valores para vazões extremas nesse rio são sugeridos

por Monte et al. (2016), que utilizaram a distribuição GEV. Na foz, as vazões com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos foram $896,79 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.207,56 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1.323,57 \text{ m}^3/\text{s}$, nesta ordem.

Para utilizar esses dados no modelo, construiu-se um hidrograma triangular cuja base corresponde ao tempo de concentração de cada bacia e a vazão de pico, à vazão extrema para um determinado tempo de retorno. Esta vazão foi posicionada no ponto médio da base do triângulo, e o hidrograma, no centro do período de simulação (Figura 7).

Figura 7 – Demonstração da construção dos dados de vazão para entrada do modelo.



Fonte: Autor (2017).

4.6 Dados de batimetria

Para o modelo utilizaram-se dados batimétricos da laguna Mundaú referentes ao ano de 2012, os quais foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). A batimetria da laguna Manguaba é proveniente de medições realizadas pela PETROBRAS em 2011. Também foram aplicadas no modelo informações da batimetria dos canais que interligam as lagoas. Esses dados foram obtidos através de uma pesquisa feita pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas em 1985. Os dados foram ajustados à referência de nível de maré do Porto de Maceió (DHN de 2012) conforme a Figura 9.

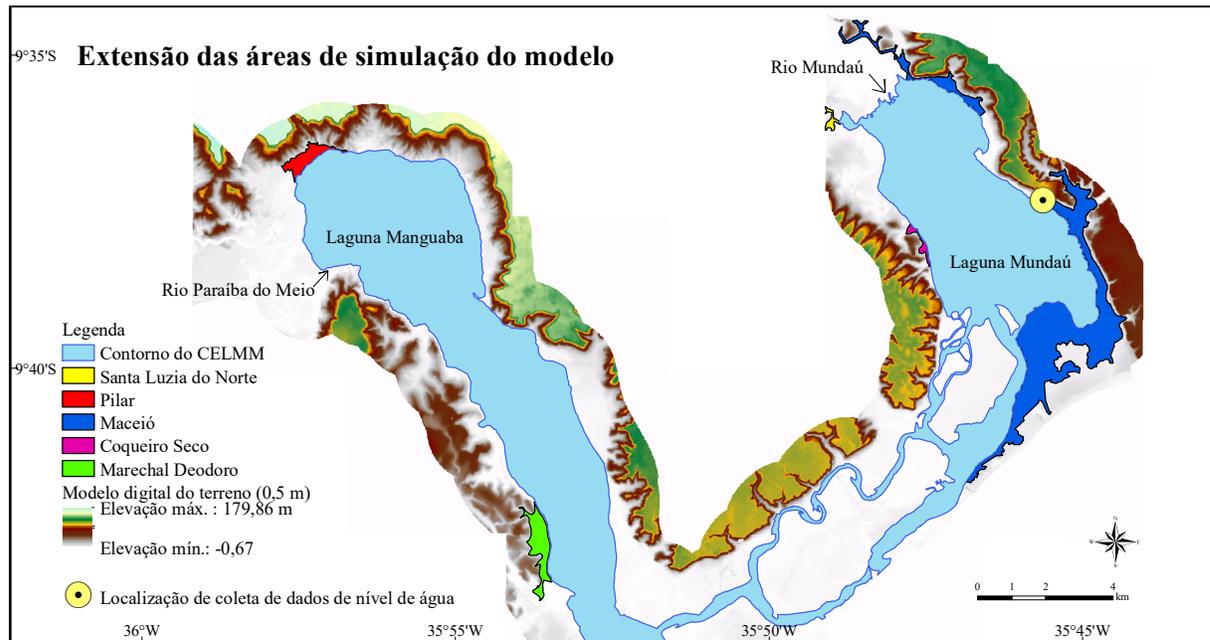
4.7 Definição dos limites de simulação, cenários de simulação e dados topográficos

Foi utilizado o módulo hidrodinâmico, com descrição tridimensional, do modelo IPH-ECO para prever o comportamento do nível superficial de água em áreas urbanas suscetíveis à inundação ao redor do CELMM.

Através de Imagem Digital do Terreno, estendeu-se o contorno atual das lagoas para as áreas urbanas vizinhas contidas em um limite de cota topográfica máxima de aproximadamente 5 metros (Figura 8), utilizando o sistema de referência DHN de 2012. Assim, definiu-se a área de atuação do modelo.

Para prever o comportamento do nível superficial da água foram criados cenários de combinações de vazões com 10, 50 e 100 anos de tempo de retorno com projeções de incrementos de maré de 3, 6 e 15 cm (Tabela 1). Os valores de vazão desta tabela correspondem aos

Figura 8 – Limites de atuação da modelagem do nível superficial de água. Cada área estendida corresponde a uma região dos municípios citados na legenda com áreas urbanizadas contidas em uma cota de até 5 metros. Área dos polígonos em m²: Coqueiro Seco: 158.289,2392; Maceió: 8.110.532,942; Marechal Deodoro: 935.259,7226; Pilar: 597.601,3909; Santa Luzia do Norte: 109.179,5969; área total: 9.910.862,892



Fonte: Adaptado de SEMARH (2017).

valores da foz de cada bacia, em que foram aplicados os fatores de correção de vazão a partir da razão entre a área de drenagem da foz da bacia e a área de drenagem do posto.

Os arquivos com as informações geradas pelo modelo contêm a série temporal do comportamento do nível da água. Deles foram extraídos valores máximos e convertidos em imagens utilizando o método da interpolação pela ponderação do inverso da distância (IDW - Inverse Distance Weighting) para que o estudo da área fosse produzido.

A correta representação topográfica é considerada por muitos autores como sendo um dos pontos principais para qualquer análise hidrodinâmica, pois disto decorre uma representação mais realista do modelo sobre o volume de água simulado (PORETTI; AMICIS, 2011).

Os dados topográficos utilizados para representar a topografia de Maceió foram disponibilizados pela base de dados de sua Prefeitura e foram convertidos da referência do IBGE para a referência de nível de maré do Porto de Maceió (DHN de 2012). Para isto, seguiram-se os ajustes de acordo com a régua de referência na Figura 9.

Nas outras cidades, a topografia foi estimada por imagens no formato MDT (Modelo Digital do Terreno) com resolução espacial de 0,5 m, referência espacial Sirgas 2000/UTM Zona 25 Sul, e cedidas pela SEMARH (Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Estes

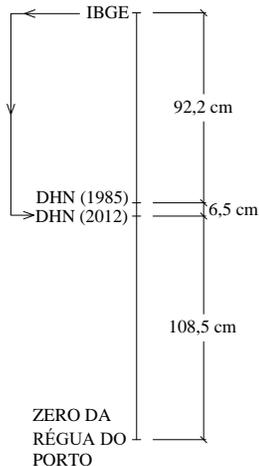
Tabela 1 – Criação dos cenários a partir das projeções de incrementos de marés futuras e das vazões máximas para os correspondentes tempos de retorno. A estes valores de vazão foram aplicados os fatores de correção para os rios Paraíba do Meio (1,43) e Mundaú (1,16). O Cenário 1 corresponde ao cenário de referência, que representa as condições atuais do comportamento do nível superficial de água no sistema.

	Tempo de retorno (anos)	Vazões máximas na foz		Incremento de maré (cm)
		lagoa Manguaba (m ³ /s)	lagoa Mundáu (m ³ /s)	
Cenário 1	-	*	*	-
Cenário 2	10	635,65	896,79	3
Cenário 3	50	847,15	1.207,56	3
Cenário 4	100	905,59	1.323,57	3
Cenário 5	10	635,65	896,79	6
Cenário 6	50	847,15	1.207,56	6
Cenário 7	100	905,59	1.323,57	6
Cenário 8	10	635,65	896,79	15
Cenário 9	50	847,15	1.207,56	15
Cenário 10	100	905,59	1.323,57	15

*Foi utilizada a série temporal das vazões

Fonte: Autor (2017).

Figura 9 – Régua de referências utilizada para a conversão do referencial do IBGE para o referencial da DHN de 2012. Esta conversão consiste na adição entre os valores 92,2 cm e 6,5 cm.



Fonte: Autor (2017).

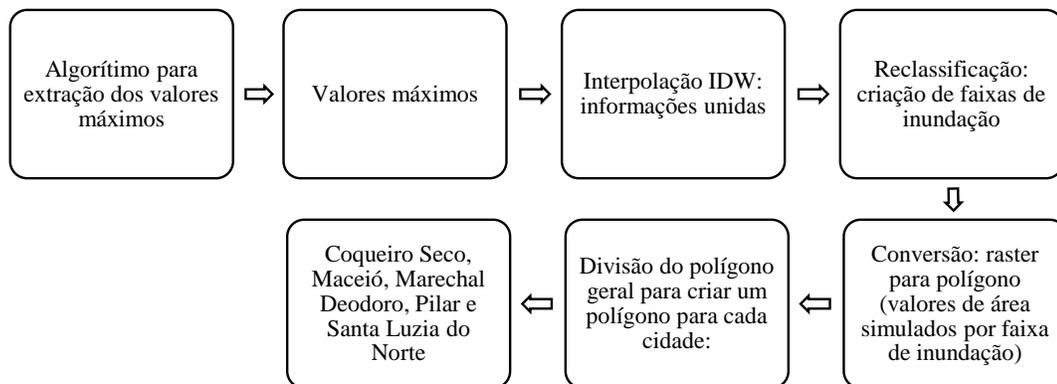
dados foram convertidos seguindo o mesmo procedimento do parágrafo anterior. Depois disso, todas as informações topográficas foram interpoladas através do modelo IPH-ECO com o objetivo de representar a morfologia do terreno.

4.8 Análise das áreas inundadas

As áreas inundadas foram mensuradas quantificando a extensão da área da mancha de inundação nos locais urbanizados contidos na área de simulação pré-definida na Figura 8. O modelo retornou informações temporais e espaciais georreferenciadas de nível superficial de água. Essas informações foram processadas de modo que os valores máximos de nível superficial de água em cada coordenada foram selecionados da série temporal.

A partir dos valores selecionados foram gerados mapas de inundação, que representam o comportamento espacial do nível superficial da água com os valores máximos ocorridos em cada cenário de simulação. Após a conversão para imagens raster, foi feita a criação das faixas de inundação através da reclassificação, e logo após, a conversão do formato raster para polígono. Esse polígono contém os valores percentuais de área inundada por faixa de inundação, mas ainda não estão separados por cidade. Para isto, foi feita a divisão do polígono, de modo que os valores das áreas inundadas tornaram-se disponíveis para cada município. Todo o processo descrito até aqui está visível no esquema da Figura 10.

Figura 10 – Esquema da sequência de atividades realizadas no processo de geração dos valores de áreas inundadas por cenário, por cidade.



Fonte: Autor (2017).

Essas imagens foram divididas em classes que representam diferentes faixas de nível superficial de água (inundação): de 0 a 0,05 m, que representa a área não inundada, pois o modelo considera que uma célula seca tem profundidade de até 5 cm, de 0,05 a 0,10 m, de 0,10 a 0,50 m, de 0,50 a 1 m, e de mais de 1 m. As variações de nível superficial da água, por simulação e por faixa de área inundada, foram mensuradas através de percentual de área, que foi atribuído a cada faixa de profundidade em relação à área de simulação de cada cidade (Figura 8).

A variação dos níveis de água de cenários futuros foi feita a partir da comparação dos seus valores em relação ao cenário de referência, que representa as condições atuais do comportamento do nível superficial de água no sistema. Desse modo, foi feita uma subtração simples entre cada faixa

de nível superficial de água de cada cenário em relação à faixa correspondente de nível superficial de água do cenário de referência. Assim, o resultado é o aumento em cada faixa de inundação em relação ao cenário de referência.

O aumento do total de áreas inundadas por simulação foi feito a partir do somatório dos valores resultantes da subtração apenas entre os valores correspondentes as faixas que de fato representam inundações, de modo que a faixa que representa as *áreas não inundadas* não foi considerada. Dessa maneira, foi possível representar a inundação total resultante por cenário, em cada cidade.

4.9 Limitações e considerações

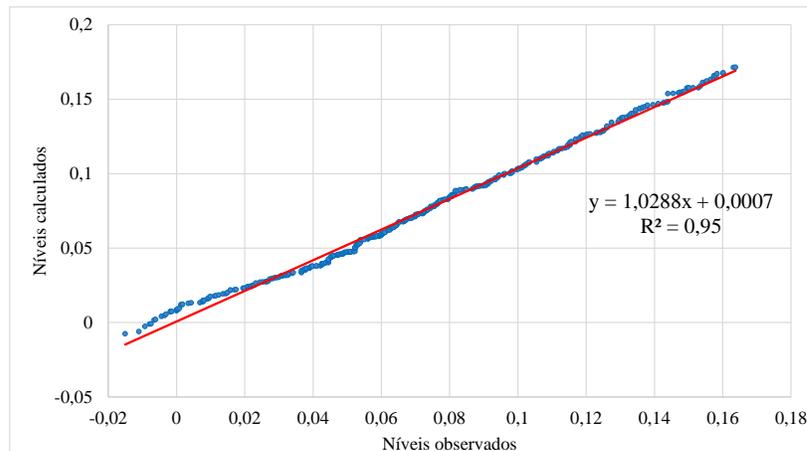
O modelo apresentou limitações no processo de interpolação dos valores de topografia em algumas regiões das margens do CELMM. Primeiramente, isto pode ser atribuído à consistência dos dados de elevação do modelo digital do terreno, que em algumas regiões apresentou valores menores que a realidade, quando comparado com ortofotos de alta resolução. Segundo, a quantidade de dados topográficos medidos manualmente na cidade de Maceió pode ter sido insuficiente na localização das margens da laguna Mundaú, e isso pode ter prejudicado a interpolação na região ao redor das margens. A resolução da grade do modelo pode ter contribuído para a perda de informações dos valores de representação do terreno através da interpolação, pois cada célula tem 50 metros de resolução. Além disso, neste estudo foram desprezados os efeitos de sedimentação do CELMM, que vem sofrendo mudanças na sua batimetria. Isto pode ter uma influência importante nos níveis de inundações futuras (MOFTAKHARI et al., 2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração e validação do modelo

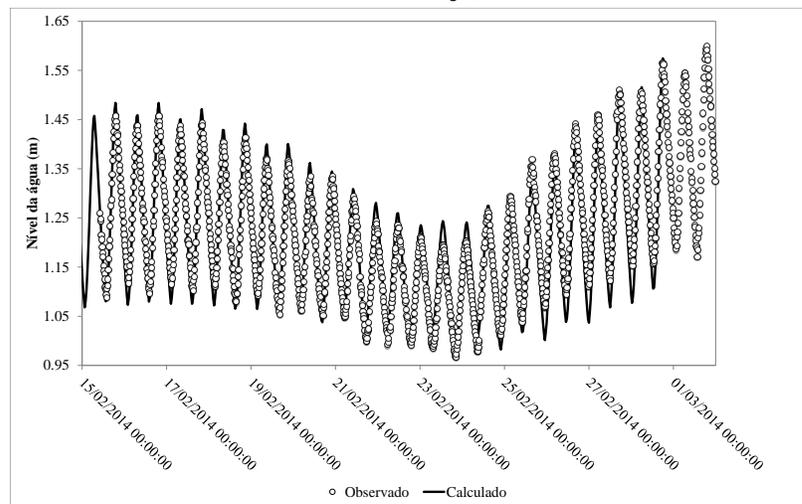
A calibração do modelo hidrodinâmico foi feita avaliando a correspondência entre os valores de nível simulados e observados no ponto situado na laguna Mundaú no período de 13 de fevereiro a 14 de março, em 2014. Os valores de nível de água resultantes da simulação foram validados pela comparação com os valores observados na medição local dentro da laguna Mundaú e estão representados na Figura 12. O valor do erro médio padrão (RMSE) para a simulação do modelo foi de 0,027. Isso indica uma boa qualidade dos valores estimados, pois quanto mais próximo de zero, maior a qualidade desses valores. O resultado da análise de regressão linear apresentou um Coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe (R^2) de 0,95. Observa-se também uma tendência do modelo em ser mais preciso para representar os valores máximos de níveis de maré (Figura 11). Os altos valores de R^2 e a ausência de erros sistemáticos residuais indicam que o modelo reproduziu a variação do nível da água com acurácia.

Figura 11 – Regressão linear entre os níveis de água calculados e observados da laguna Mundaú.



Fonte: Autor (2017).

Figura 12 – Comparação entre os valores de nível de água observados e simulados na laguna Mundaú no período de 13 de fevereiro a 14 de março, em 2014. Valores da DHN 2012.



Fonte: Autor (2017).

5.2 Análise relativa de percentual de áreas inundadas

Os resultados mostram que para todas as previsões de aumento do nível médio do mar houve áreas inundadas, exceto para o cenário 2 (ano 2025 e vazão com tempo de retorno de 10 anos), em duas cidades (Coqueiro Seco e Santa Luzia do Norte, na Figura 14). Essas inundações ocorreram mesmo para a condição menos crítica. Entre todas as situações, o cenário mais crítico para todas as cidades foi o cenário 10, que consiste no efeito combinado entre 15 cm de aumento do nível médio do mar (em 2065) e uma vazão com tempo de retorno de 100 anos. As áreas inundadas variam entre 0 e 41,9 %, dependendo do tempo de retorno (Figura 14).

Tabela 2 – Total em percentual de áreas inundadas em cada simulação.

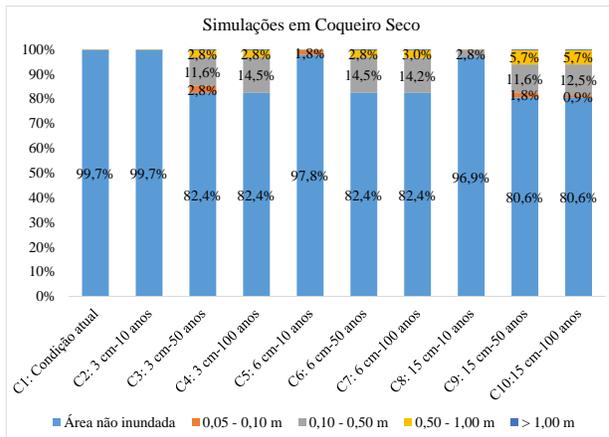
Cenários simulados	Projeção do ANM em:	Q com tempo de retorno (anos)	Área inundada (%)
C1: Condição atual	série de 2014	série de 2014	2,2%
C2: 3 cm-10 anos	2025 (3 cm)	10 anos	7,2%
C3: 3 cm-50 anos		50 anos	13,3%
C4: 3 cm-100 anos		100 anos	13,3%
C5: 6 cm-10 anos	2035 (6 cm)	10 anos	14,0%
C6: 6 cm-50 anos		50 anos	14,5%
C7: 6 cm-100 anos		100 anos	9,2%
C8: 15 cm-10 anos	2065 (15cm)	10 anos	9,2%
C9: 15 cm-50 anos		50 anos	16,2%
C10: 15 cm-100 anos		100 anos	16,8%
C11: 15cm-vazão atual		série de 2014	7,7%

Fonte: Autor (2017).

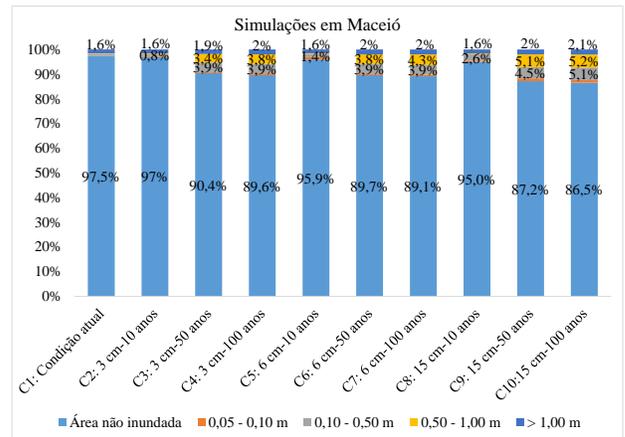
Os níveis máximos variam muito pouco entre os cenários 9 e 10 nas áreas inundadas, nos quais a profundidade alcança cerca de 1 m. Essa pequena variação leva a um aumento modesto da extensão de áreas inundadas, usualmente entre 0 e 0,6 % (Figura 14). O efeito do aumento dos níveis máximos é mais significativo na parte sudeste da laguna Mundaú, em especial nos locais mais planos, como no bairro Bom Parto, em Maceió (ver mapas de inundação na Figura 15). Em cenários futuros de aumento do nível do mar, a extensão e a profundidade de áreas inundadas irão aumentar. Para o pior cenário (ano de 2065 e vazão com tempo de retorno de 100 anos), o crescimento da extensão de áreas inundadas é mais evidente em Maceió, na laguna Mundaú.

A maioria das cidades apresentou um aumento gradual suave entre o cenário 1 e o cenário 10, chegando ao máximo de 6% de diferença em Santa Luzia do Norte. Porém, em Maceió e em Coqueiro Seco, o aumento entre esses cenários apresentou maior amplitude chegando a 10,4% para a primeira cidade e 17,3% para a segunda. As características topográficas do terreno podem ser decisivas para explicar o comportamento do nível superficial da água. Terrenos mais planos apresentam um gradiente menor de inclinação do terreno, enquanto que naqueles menos planos esse gradiente tende a ser maior, refletindo assim no comportamento do nível superficial de água.

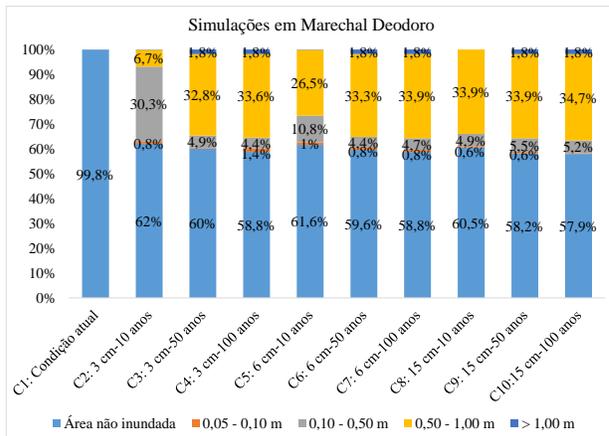
Os resultados mostram que a região urbana às margens do CELMM é vulnerável a inundações quando o aumento do nível do mar é considerado (Figura 15, mapas de inundação). Os resultados (Tabela 2) indicam que cerca de 7,2 % da área urbana delimitada neste estudo será vulnerável a inundações para o cenário 1 (ano de 2025 e vazão com tempo de retorno de 10 anos), aumentando para 14,5 % no cenário 6 (ano de 2035 e vazão com tempo de retorno de 50 anos) e para 16,8 % no cenário 10 (ano de 2065 e vazão com tempo de retorno de 100 anos).



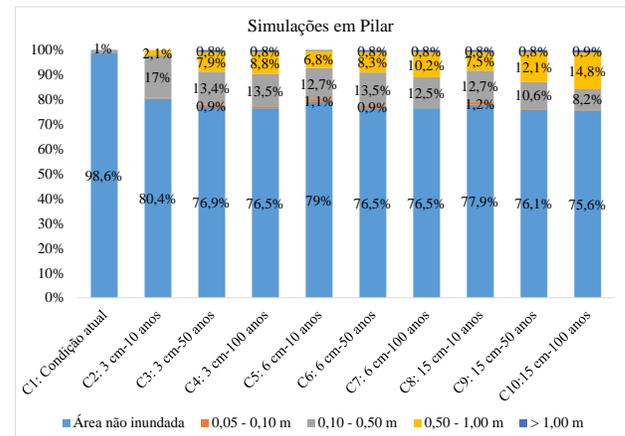
(a) Simulação em Coqueiro Seco



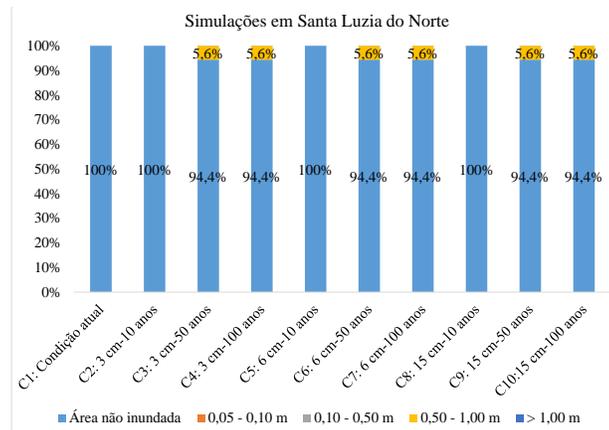
(b) Simulação em Maceió



(c) Simulação em Marechal Deodoro



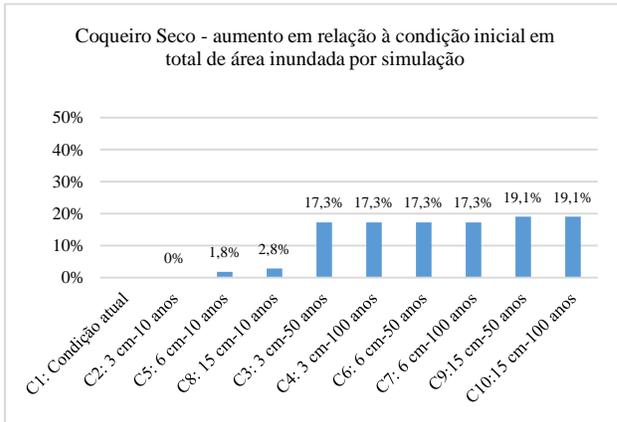
(d) Simulação em Pilar



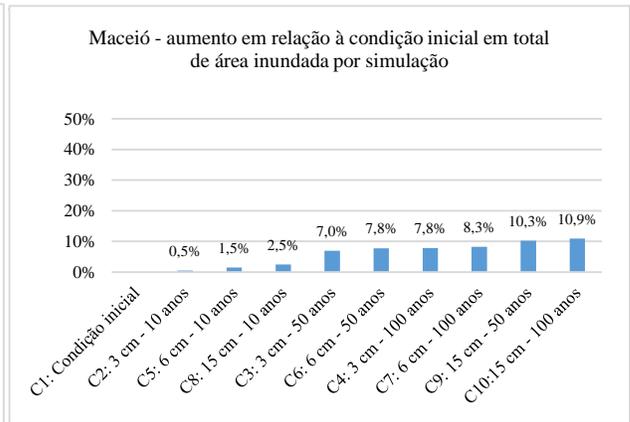
(e) Simulação em Santa Luzia do Norte

Figura 13 – Percentual de áreas que sofreram inundações de 0,05 a 0,10 m, 0,10 a 0,50 m, 0,50 a 1 m e mais de 1 m, a partir das simulações realizadas em cada cidade para diferentes combinações de cenários de níveis de marés de sizígia de 3 cm, 6cm e 15 cm, e vazões máximas com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos

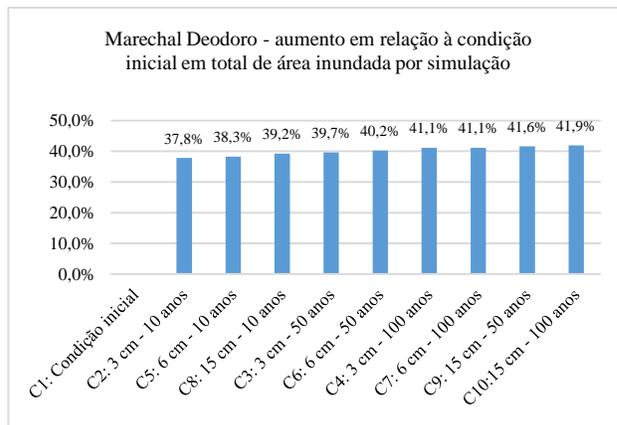
Fonte: Autor (2017).



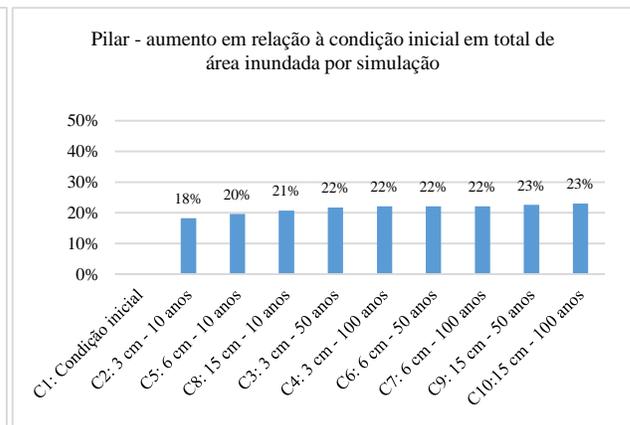
(a) Aumento relativo em Coqueiro Seco



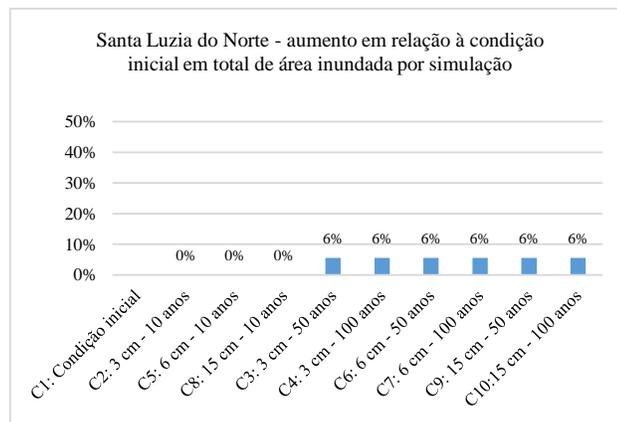
(b) Aumento relativo em Maceió



(c) Aumento relativo em Marechal Deodoro



(d) Aumento relativo em Pilar



(e) Aumento relativo em Santa Luzia do Norte

Figura 14 – Aumento percentual de áreas inundadas em relação ao cenário de referência por cenário de simulação em cada cidade.

Fonte: Autor (2017).

5.3 Descrição e análise dos mapas de inundação em Maceió

O pior cenário, na Figura 15(d), mostra que inundações com profundidade variando de 90 a 15 centímetros ocorreram em uma extensão de aproximadamente 300 metros a partir da margem da laguna Mundaú, no bairro Bom Parto. Nesta região específica, as cotas e gradiente topográficos são menores, o que explica o maior alcance da extensão da área inundada. Esta área abrange um número de mais de 8.000 pessoas que serão afetadas por pequenas e frequentes inundações. Esses valores foram obtidos através dos mapas de densidade demográfica dos 11 setores localizados neste bairro, pelo Censo Demográfico do IBGE de 2010 (Figura 16). Embora esta seja a região com maior extensão de área inundada, o modelo também encontrou inundações menos extensas em outros bairros de Maceió e em outros municípios no entorno do CELMM.

Os resultados sobre as manchas de inundação neste estudo são reforçados pelo resumo executivo do Plano de Ações e Gestão Integrada do CELMM (Agência Nacional de Águas, 2006), que define áreas de risco natural e social na laguna Mundaú. Estas áreas de risco, além de corroborarem com as inundações mapeadas pelo modelo, ajudaram a elaborar o processo de entendimento acerca das prováveis implicações da ocorrência dos transtornos de inundação na vida da população do entorno do CELMM.

Em relação ao risco natural, o Plano define como sendo aquele associado ao comportamento dinâmico dos sistemas naturais, como inundações, desabamentos e acelerações de processos erosivos. De acordo com o Plano, as áreas de risco natural sujeitas à inundação, referem-se àquelas irregularmente ocupadas e ocorrem nos bairros do Pontal, Trapiche, Ponta Grossa, Vergel do Lago, Bom Parto, Chã de Bebedouro e Fernão Velho, além dos municípios de Coqueiro Seco, Santa Luzia do Norte e Satuba. Com exceção de Satuba, que não fez parte da área de simulação, todas as localidades citadas apresentaram potencial para inundações a partir da previsão da ocorrência de aumento do nível do mar e de vazões extremas.

O plano define como risco social, aquele associado às condições de habitabilidade expressas no acesso aos serviços básicos, tais como água tratada, esgotamento de resíduos e coleta de lixo. Dentro dessa área de risco social, há uma grande concentração de ocupações subnormais nos canais do Trapiche e da Levada abrangendo 17.139 domicílios e no Bairro de Bom Parto com 1.200 domicílios. O IBGE conceitua o termo ocupações subnormais como sendo um conjunto constituído de pelo menos 51 unidades habitacionais como barracos ou mesmo casas, os quais apresentam carência principalmente de serviços públicos essenciais, e que ocupam terreno de propriedade alheia (pública ou particular) até período recente e estão dispostas geralmente de forma desordenada e densa.

Diante disso, e a partir dos resultados das projeções de nível superficial da água do presente estudo neste sistema estuarino lagunar, fica evidente que a ocorrência de inundações mais frequentes causadas pela redução do espaço entre o nível da água e o nível do solo acarretará em um impacto

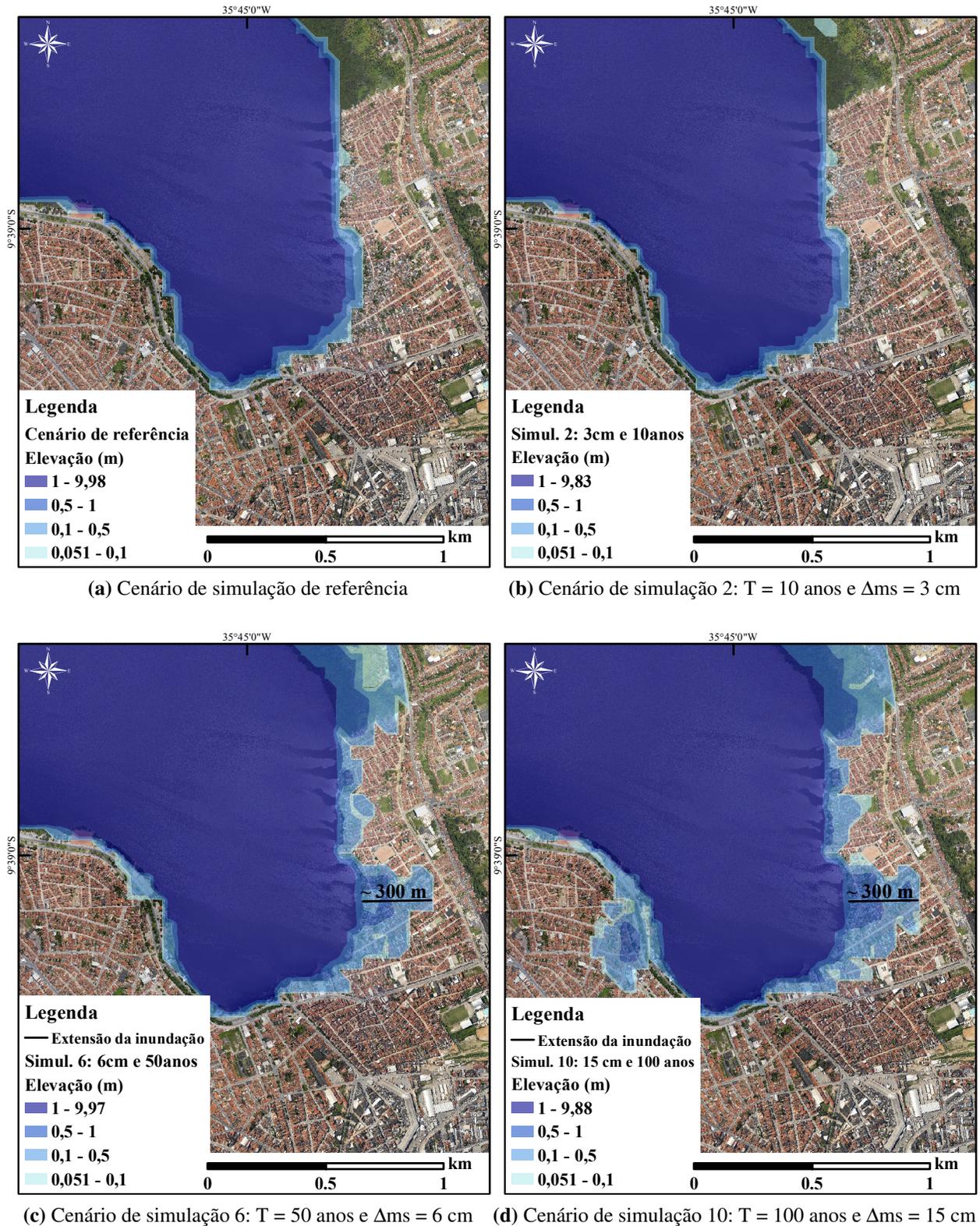


Figura 15 – Mancha de inundação criada a partir das simulações na região da cidade de Maceió com valores topográficos mais suscetíveis a inundações. Cada cenário é uma combinação entre a vazão extrema para um determinado tempo de retorno (T_r) e um incremento de maré (Δms) associado a uma projeção futura de aumento do nível do mar.

Fonte: Autor (2017).

socioeconômico ainda mais intensificado. Isto é devido ao fato de que são populações vulneráveis que estão sujeitas a sofrer as maiores e mais irreparáveis perdas devido a fatores de vulnerabilidade social (MOFTAKHARI et al., 2015).

Já é conhecido que Maceió é o município com maior ocorrência de problemas de drenagem pluvial do CELMM e das bacias contribuintes. Durante precipitações mais intensas, as áreas das margens da laguna Mundaú são fortemente atingidas devido à ocupação desordenada. O aumento da frequência de inundações irá demandar ainda mais recursos financeiros e humanos na manutenção do sistema de drenagem pluvial dessa região, que já sofre problemas graves ligados à falta de manutenção e ao lançamento de esgoto sanitário e de lixos nos canais e nas galerias.

As inundações frequentes possivelmente gerarão um sério impacto na saúde pública e no meio ambiente, se afetarem, a título de exemplo, o sistema de esgotamento. A exposição à doenças de veiculação hídrica, à poluição e a poluentes é altamente deletéria à saúde humana e ao ecossistema. A redução da qualidade ambiental da água pelas transformações de suas propriedades físico-químicas como pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, materiais fluidos e em suspensão, e transparência, e a incidência de eutrofização, trará ainda mais prejuízo à fauna e às atividades turística, de pescada e de sururu, tanto para o comércio quanto para o consumo próprio. Ademais, já é conhecido que a laguna Mundaú vem sofrendo uma queda na produção pesqueira (TORRES, 2004).

Além das implicações apontadas, as inundações frequentes podem ser influenciadas por alterações na batimetria do CELMM (MOFTAKHARI et al., 2015). Os últimos levantamentos têm mostrado que o processo de assoreamento na laguna Mundaú transcorre a uma taxa média de $1,15 \text{ cm}\cdot\text{ano}^{-1}$, e na Manguaba, essa taxa é de $1,59 \text{ cm}\cdot\text{ano}^{-1}$ (SOUZA; Comunicação pessoal, 2017). Se considerarmos um mesmo hidrograma de enchente incidindo sobre a laguna nas condições atuais de batimetria e depois em condições futuras de assoreamento, fica evidente que o comportamento hidrodinâmico não será o mesmo. Com a perda de profundidade, a laguna pode perder o efeito de dissipação de energia pela perda de seu volume útil (PAVLOV, 2013), podendo intensificar os efeitos negativos das inundações.

Na região da mancha de inundação, no bairro do Bom Parto, estão localizados os 11 setores censitário que serão os mais afetados. O número de pessoas que podem ser afetadas direta e indiretamente pelas inundações pode chegar a cerca de 8.000. Trata-se de uma população em geral com baixa renda, em que cerca de 14% possui um rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até R\$70 (Figura 16 e Tabela 3).

A baixa vulnerabilidade dessa população exposta à mancha de inundação constitui um fator potencializante dos efeitos que inundações frequentes podem causar. Grande parte das áreas próximas às margens das lagunas é constituída por população carente, e por isso, classificadas como vulneráveis, já que estão sujeitas a sofrer as maiores e mais irreparáveis perdas devido a

Tabela 3 – Dados censitários dos setores atingidos pela mancha de inundação simulada para o pior cenário.

Setor	População do setor censitário	População com idade entre 0-5 anos por setor censitário	População com idade maior que 60 anos por setor censitário	Pessoas com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até R\$70 por setor censitário
16	1142	150,5	59	164
15	1074	122,5	59	66
12	739	97	59	165
11	785	97	59	96
7	1031	97	98	156
10	434	72	19,5	107
8	701	72	59	66
9	441	72	19,5	74
5	909	122,5	19,5	165
4	399	47	19,5	89
3	429	47	19,5	77
Total	8084	996,5	490,5	1225

Fonte: Adaptado dos dados censitários de 2010 do IBGE, (2016).

fatores de vulnerabilidade social (MOFTAKHARI et al., 2015). Embora a vulnerabilidade seja um fator importante quando se trata de inundação, os planos anteriores de ações e gestão integrada do CELMM trataram de maneira pouco aprofundada as inundações no seu entorno.

Os danos à infraestrutura urbana já são presentes. Um exemplo disso é a erosão da água em alguns trechos de uma via urbana adjacente à laguna Mundaú, no bairro do Pontal da Barra. É comum a implantação de medidas estruturais de curto e médio prazo como o enrocamento construído nessas nas referidas vias (Figuras 3 e 4). Com o aumento da frequência de inundações, esse tipo de dano será intensificado e medidas de proteção de curto prazo podem não ser mais tão eficazes.

Por isso, medidas de proteção mais eficientes devem ser implantadas a fim de se evitar que inundações menos intensas e mais frequentes afetem as cidades. A frequência das inundações pode expor a infraestrutura a um estresse contínuo, levando a uma aceleração no processo de envelhecimento (MERRIFIELD et al., 2013). As proteções contra inundações presente devem ser melhoradas levando-se em consideração as mudanças climáticas. Isso evita perdas e reparações cujo custos médios podem ser maiores que os custos das obras (HALLEGATTE et al., 2013).

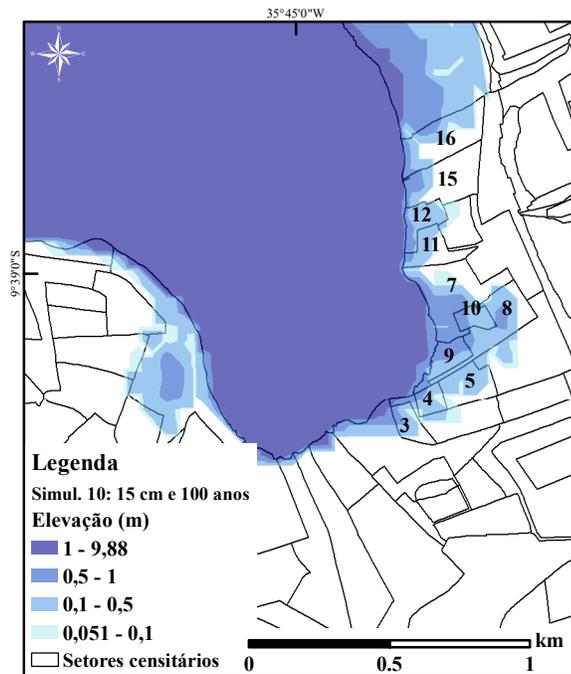


Figura 16 – Mancha de inundação do pior cenário de simulação sobreposta à densidade demográfica dos setores censitários. A nomenclatura dos setores apresentados na figura foram adaptadas a partir da nomenclatura do IBGE da seguinte forma: setor 3: 270430205090003; setor 4: 270430205090004; setor 5: 270430205090005; setor 7: 270430205090007; setor 8: 270430205090008; setor 9: 270430205090009; setor 10: 270430205090010; setor 11: 270430205090011; setor 12: 270430205090012; setor 15: 270430205090015; setor 16: 270430205090016.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostrou que a ocorrência de uma vazão com tempo de retorno de 50 anos combinado com um aumento nos níveis de marés de sizígia de 15 centímetros é suficiente para causar inundações que podem alcançar uma extensão de até 300 metros a partir das margens da laguna Mundaú, mais precisamente no bairro do Bom Parto, em Maceió (Figura 15). Isso indica que, caso ocorra a vazão com tempo de retorno de 50 anos e caso se cumpram as previsões de aumento de nível do mar, essas inundações mais frequentes podem advir, uma vez que o aumento de 15 cm está associado ao crescimento global do nível do mar, numa projeção de 50 anos, sugerido por Merrifield et al. (2013).

Neste estudo considerou-se a batimetria de 2014, mas essa batimetria está sofrendo transformações pelo processo de assoreamento, que vem ocorrendo a uma taxa de $1,15 \text{ cm}\cdot\text{ano}^{-1}$ na laguna Mundaú e $1,59 \text{ cm}\cdot\text{ano}^{-1}$ na Manguaba, em estudos preliminares (SOUZA; Comunicação pessoal, 2017).

As mudanças sofridas na batimetria podem potencialmente modificar o comportamento da hidrodinâmica local. Com a perda de profundidade, o processo de inundações menores e mais frequentes pode ser intensificado, uma vez que os efeitos das vazões extremas e dos movimentos

ascendentes de marés no sistema podem ser amplificados em relação ao efeito hidrodinâmico entre a batimetria de 2014 e uma batimetria futura, devido à redução da lacuna entre o nível da superfície da água e o da superfície do solo (HALLEGATTE et al., 2013; MOFTAKHARI et al., 2015).

As manchas de inundação mapeadas neste estudo são corroboradas pelas áreas de risco natural e social na laguna Mundaú, que são definidas no resumo executivo do Plano de Ações e Gestão Integrada do CELMM (Agência Nacional de Águas, 2006). Com essas informações e os dados censitários do IBGE de 2010, o presente trabalho mostrou que uma população de mais de 8.000 pessoas pode ser afetada direta ou indiretamente, só no bairro do Bom Parto, por inundações pequenas, mas frequentes (Figura 16 e Tabela 3). As áreas mais próximas às margens, que serão as mais afetadas, abrangem essa população, que, em geral, é carente e, portanto, são classificadas como *vulneráveis*, pois estão sujeitas a sofrer as maiores e mais irreparáveis perdas devido a fatores de vulnerabilidade social (MOFTAKHARI et al., 2015). A partir dessa perspectiva, conclui-se que os impactos socioeconômicos serão mais intensos à medida em que se aumenta a frequência de pequenas inundações.

Sobre o comportamento dos níveis simulados, o modelo não registrou variações nos valores de áreas inundadas entre alguns cenários, como em Santa Luzia do Norte e em Coqueiro Seco (Figura 14 (e) e (a)). A imprecisão da representação topográfica pelo MDT pode ter contribuído para esse comportamento dos níveis de água simulados. Por outro lado, as próprias características topográficas e de declividade do terreno podem ter contribuído para esse resultado, uma vez que as faixas de extensão entre as margens da laguna Mundaú e a cota máxima de 5 m é muito curta. Dessa forma, não há condições morfológicas no terreno que favoreçam a ocorrência de inundações com maiores profundidades.

Os valores das áreas inundadas entre os cenários tiveram uma variação gradual mais intensa em Pilar e mais suave em Maceió e Marechal Deodoro, como esperado (Figura 14 (d), (b) e (c)). Esse comportamento se deve ao fato da morfologia do terreno, que apresenta menor gradiente topográfico entre as áreas inundadas. Para a maioria dos cenários, os maiores aumentos de nível de água ocorreram entre os tempos de retorno (Figura 14). Isso indica que o modelo mostrou-se mais sensível ao tempo de retorno em simular os níveis superficiais de água.

REFERÊNCIAS

AERTS, J. C. J. H. et al. Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities. *Science*, v. 344, n. 6183, p. 473–475, maio 2014. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/content/344/6183/473>).

Agência Nacional de Águas. *Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú - Manguaba (CELMM): Resumo executivo*. Brasília: ENGECORPS, 2006. ISBN 85-89629-09-0. Disponível em: http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/planoderecursos/Celmm_Inicial.aspx).

ARMCANZ. (AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT COUNCIL OF AUSTRALIA AND NEW ZEALAND) ARMCANZ). Floodplain management in Australia: Best practice principles and guidelines. Collingwood Victoria: Australia, 2000. ISSN 9780643095281. Disponível em: http://www.floodcommission.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0012/11019/QFCI.Exhibit_1007_SCARM_Report_73_-_Floodplain_management_in_Australia_-_best_practice_principles_and_guidelines.pdf).

BRITO, A. N.; FRAGOSO, C. R. Tidal exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil. (em execução). 2017.

CASULLI, V.; CHENG, R. T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 15, n. 6, p. 629–648, 1992. ISSN 1097-0363. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/flid.1650150602>).

CAZENAVE, A. et al. The rate of sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 5, p. 358–361, 2014. ISSN 1758-678X. Disponível em: <http://www.nature.com/nclimate/journal/v4/n5/full/nclimate2159.html>).

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. A 20th century acceleration in global sea-level rise: AN ACCELERATION IN GLOBAL SEA-LEVEL RISE. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 1, p. n/a–n/a, jan. 2006. ISSN 00948276. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL024826>).

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, v. 32, n. 4-5, p. 585–602, mar. 2011. ISSN 0169-3298, 1573-0956. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10712-011-9119-1>).

CONSULTORIA TÉCNICA LTDA. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Mundaú (PDRH - Bacia do Mundaú). Recife: COTEC. p. 168. 1999.

FRAGOSO, C. R. et al. IPH-TRIM3d-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, v. 24, n. 11, p. 1347–1348, nov. 2009. ISSN 13648152. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815209001182>.

GAMA, W. M. Impacto das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio (AL/PE). 2011.

HALLEGATTE, S. et al. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 802–806, 2013. ISSN 1758-678X. Disponível em: <http://palgrave.nature.com/nclimate/journal/v3/n9/full/nclimate1979.html>.

HINKEL, J. et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 111, n. 9, p. 3292–3297, mar. 2014. ISSN 0027-8424. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3948227/>.

IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 1996. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>.

IPCC. *Regional climate projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 2007.* Disponível em: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.

JONGMAN, B.; WARD, P. J.; AERTS, J. C. J. H. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, v. 22, n. 4, p. 823–835, 2012. ISSN 0959-3780. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012000830>.

JR, A. H. S.; DORAN, K. S.; HOWD, P. A. Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic coast of North America. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 12, p. 884–888, 2012. ISSN 1758-678X. Disponível em: <http://www.nature.com/nclimate/journal/v2/n12/full/nclimate1597.html>.

KOPP, R. E. et al. Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 11, p. E1434–E1441, mar. 2016. ISSN 0027-8424, 1091-6490. Disponível em: <http://www.pnas.org.ez9.periodicos.capes.gov.br/content/113/11/E1434>.

KRON, W. et al. How to deal properly with a natural catastrophe database – analysis of flood losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 12, n. 3, p. 535–550, 2012. Disponível em: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/535/2012/>.

MARQUES, D. M. L. d. M. et al. *IPH-ECO model - Manual científico*. [S.l.]: Grupo de Pesquisa Ecotecnológica, 2012.

MERRIFIELD, M. A. et al. Sea level variability and change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. S7, p. S81–S84, 2012. ISSN 0003-0007. Disponível em: <http://nora.nerc.ac.uk/19077/>.

MERRIFIELD, M. A. et al. [Global Oceans] Sea level variability and change [in "State of the Climate in 2012]. v. 94, p. S68–S72, 2013. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2013BAMSStateoftheClimate.1>.

MILNE, G. A. et al. Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience*, v. 2, n. 7, p. 471–478, jul. 2009. ISSN 1752-0894. Disponível em: <http://www.nature.com/ngeo/journal/v2/n7/full/ngeo544.html>.

MOFTAKHARI, H. R. et al. Increased nuisance flooding along the coasts of the United States due to sea level rise: Past and future. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 22, p. 2015GL066072, nov. 2015. ISSN 1944-8007. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL066072/abstract>.

MONTE, B. et al. Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 152–167, fev. 2016. ISSN 23180331. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5156>.

NASH, J.; SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, abr. 1970. ISSN 00221694. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022169470902556>.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 37, n. 6, p. 575–591, 1993. ISSN 0272-7714. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771483710747>.

PAVLOV, V. V. Impounding reservoir spillways and energy dissipators: hydraulic design challenges and lessons learnt. *Dams and Reservoirs*, v. 23, n. 2, p. 58–65, jun. 2013. ISSN 1368-1494. Disponível em: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/dare.13.00020>.

PORETTI, I.; AMICIS, M. D. An approach for flood hazard modelling and mapping in the medium Valtellina. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 11, n. 4, p. 1141–1151, abr. 2011. ISSN 1684-9981. Disponível em: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1141/2011/>.

SAMPSON, C. C. et al. A high-resolution global flood hazard model. *Water Resources Research*, v. 51, n. 9, p. 7358–7381, 2015. ISSN 1944-7973. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015WR016954/abstract>.

Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. *Comitê de Bacia da Região Hidrográfica CELMM — SEMARH - AL*. 2017. Disponível em: <http://www.semarh.al.gov.br/comites-de-bacias/comite-de-bacia-da-regiao-hidrografica-celmm>.

SMALL, C. Coastal hazards and the global distribution of human population. *Environmental geosciences*, n. 1, p. 3–12, 2000. ISSN 1075-9565.

SMALL, C.; NICHOLLS, R. J. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research*, v. 19, n. 3, p. 584–599, 2003. ISSN 0749-0208. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4299200>.

SOUZA, A. P. d. M.; Comunicação pessoal. Avaliação do efeito do assoreamento no tempo de residência e na hidrodinâmica de um complexo estuarino lagunar tropical. Universidade Federal de Alagoas - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió-AL, 2017.

TEBALDI, C.; STRAUSS, B. H.; ZERVAS, C. E. Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts. *Environmental Research Letters*, v. 7, n. 1, p. 014032, 2012. ISSN 1748-9326. Disponível em: <http://stacks.iop.org/1748-9326/7/i=1/a=014032>.

TORRES, C. A. A. A expansão urbana de Maceió e seus reflexos ambientais na Laguna Mundaú. 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6688>.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002. ISSN 2318-0331. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=99&SUMARIO=1583>.

UNISDR. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. 2009. Disponível em: http://www.preventionweb.net/files/9414_GARsummary.pdf.

WAHL, T.; CHAMBERS, D. P. Evidence for multidecadal variability in US extreme sea level records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 3, p. 1527–1544, mar. 2015. ISSN 2169-9291. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JC010443/abstract>.