

SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA CONTER INUNDAÇÕES DE ORIGEM MARÍTIMA NA PONTA DA PRAIA, EM SANTOS, COM MÍNIMO IMPACTO AMBIENTAL

Celina Maria Honório Job

Joseph Harari

RESUMO

Elevações significativas do nível do mar têm causado grandes transtornos em Santos, no litoral do Estado de São Paulo. Inicialmente, este projeto fez um levantamento das ressacas ocorridas em Santos desde 1945 até 2013, incluindo a determinação dos níveis atingidos. Numa fase inicial, características das ressacas foram analisadas, considerando sua frequência e sua intensidade. Como solução para o problema das inundações, a proposta deste trabalho foi de analisar a viabilidade da construção de um sistema de contenção de inundações, com painéis colocados em valas na linha não influenciada por mudanças geomorfológicas dos sedimentos da praia, próximo ao calçadão, e que seriam erguidos com o acionamento de pistões pneumáticos, em caso de grandes elevações do nível do mar, tendo esse sistema mínima influência na linha de costa, já que seria ativado pelo sistema de alerta e seria localizado em um recuo onde não há fortes mudanças na hidrodinâmica sedimentar da costa. Foram realizadas simulações numéricas para os anos de 2016 e 2017, para determinar o comportamento hidrodinâmico da região costeira

e, assim, analisar a viabilidade técnica em cenários de projeto de um sistema de contenção. Além disso, é apresentado um esboço de análise de impacto ambiental para a implantação do sistema de contenção sugerido. Este trabalho é fruto da pesquisa de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente realizada no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

Palavras-chave: Simulação Numérica; Inundação; Obras de Contenção; Impacto Ambiental.

1. INTRODUÇÃO

O município de Santos, localizado no Estado de São Paulo, na parte central do litoral do Estado, compreende uma área de 280,3 km², fazendo parte da Província Costeira do Planalto Atlântico. De acordo com o IBGE (2017), a população aferida no censo de 2010 era de 419.400 pessoas. A projeção para julho de 2020 é de 433.656 pessoas. A região da Baixada Santista foi uma das primeiras áreas ocupadas no Estado de São Paulo e no país e, atualmente, seu desenvolvimento econômico está ligado às atividades do porto de Santos e ao turismo de veraneio.

Este trabalho é baseado na dissertação de mestrado “Simulação numérica de solução construtiva para contenção de inundações de origem marítima na Ponta da Praia, em Santos, com mínimo impacto ambiental”, defendida no Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM – IEE USP) em 2020 (JOB, 2020). Esta pesquisa propõe uma solução construtiva que afete o mínimo possível a hidrodinâmica sedimentar costeira para a região de Ponta da Praia, em Santos, a qual tem sofrido com ressacas acentuadas em épocas de maré alta e frentes causadoras de chuvas intensas; no entanto, as inundações são devidas não somente a efeitos naturais, mas também à ação antrópica de urbanização e impermeabilização do solo.

Esta pesquisa apresenta a proposta de construção de valas na região da Ponta da Praia, na linha não influenciada por mudanças geomorfológicas dos sedimentos da praia, para a inserção nessas valas de painéis resistentes, que podem ser erguidos em caso de ressacas com o acionamento de pistões pneumáticos, de modo a proteger a região metropolitana de inundações sem influenciar a dinâmica natural da área costeira, a qual está sempre sob influência do transporte de sedimentos e mudanças morfológicas devido a fenômenos naturais cíclicos (JOB, 2020). Atualmente, há um calçadão nessa área, que precisaria ser reconfigurado no caso da implantação dessa contenção de inundações.

A área que compõe a cidade de Santos possui diversas formações, basicamente relevo tipo planície, terraços marinhos e campos de dunas. O conjunto de formas decorre de uma complexidade de processos morfogenéticos, nos quais as interações de atividades construtivas e destrutivas das águas oceânicas ao longo da faixa litorânea se confrontam com as influências das águas continentais, também construtoras e destruidoras de formas e depósitos eólicos, que exercem importante papel de remobilização dos sedimentos marinhos.

Nas Planícies de Mangues, a interação entre as águas oceânicas e continentais proporciona um ambiente único para a formação e o desenvolvimento de espécies animais e vegetais extremamente importantes para a sustentação do ecossistema. Dessa forma, qualquer desequilíbrio ambiental nessas planícies gera impactos diretos, por ser um ecossistema extremamente frágil, tanto em relação ao meio físico quanto ao biótico. Essas áreas desenvolvem-se sobre um pacote de sedimentos quaternário de espessura variada, que obedece ao mesmo padrão de distribuição em toda a costa paulista (IPT, 1981).

A área de interesse desse projeto já está coberta pela mancha urbana, mas, ainda assim, é composta de formações diversas em seu perfil de solos. Esses fatores devem ser observados, com relação às sondagens necessárias para eventual implantação de um projeto de contenção, tendo em vista a profundidade na qual devem ser fixadas estruturas na costa.

De acordo com Max Weber (1921), as cidades se caracterizam como mercado e sede de poder, possuindo autonomia política. Segundo o autor, o elemento novo nas sociedades modernas (em comparação com a antiguidade) é representado pelos processos produtivos que, baseados na racionalidade capitalista e na impessoalidade, combatem e substituem formas econômico-sociais tradicionais.

No período entre 1550 e 1822, o processo de urbanização da região de interesse do presente estudo se deu basicamente em torno da existência do Porto de Santos, que, para os padrões da época, pôde ser considerado uma grande infraestrutura, mais resultante das condições naturais do estuário do que da própria intervenção do homem, pois o cais, naquele período, não alcançava ainda 70 metros de extensão. A partir de 1822, o cenário mudou devido à independência do Brasil e à abertura dos portos, gerando um crescimento dos negócios com outras nações, o que permitiu uma rápida expansão dos negócios de exportação, que se refletiu no crescimento do porto.

Segundo Zündt et al. (2011), a força econômica advinda das atividades portuárias e industriais, aliadas à construção de infraestruturas de energia, abastecimento e acessibilidade à região, ocorridas a partir da segunda metade

do século XX, culminando com a construção da segunda pista da Rodovia dos Imigrantes, atraíram uma grande massa de trabalhadores da construção civil que, sem qualificação, terminadas as obras das rodovias, se instalaram na região, acomodando-se na indústria da construção civil, principalmente naquela voltada ao turismo de veraneio.

Apesar de não apresentar grandes problemas de receitas e arrecadação, devido à posição de polo da região e pela presença do porto, por sua condição de centralidade e polarização dos empregos e atividades, Santos tem grande número de loteamentos clandestinos e ocupações desconformes. Santos detém, na atualidade, a característica de polo de desenvolvimento e atração da população dos municípios vizinhos, apresentando crescimento da economia de base terciária, mais especificamente nos setores comercial e de serviços.

De acordo Diegues (2000), existem duas situações de exploração dos recursos naturais pelas populações de baixa renda da Baixada Santista: a das populações tradicionais, que se estabeleceram na região antes da fase atual de desenvolvimento regional, e a dos migrantes, que vieram para a região atraídos justamente por esse processo de desenvolvimento. As formas pelas quais cada um desses grupos utiliza os recursos naturais é distinta, tanto pelas características culturais como pela base econômica que possuem. Segundo o autor, há uma desestruturação no modo de vida das populações tradicionais, graças às mudanças sociais que ocorrem na região e à redução da captura por unidade-de-esforço nos estuários. No caso da pesca, formam o grupo social com maior conhecimento da ecologia dos estuários e da necessidade de um manejo adequado de seus recursos.

Ainda segundo Diegues (2000), as comunidades caiçaras mantiveram sua forma de vida tradicional até a década de 1950, até o início do fluxo migratório decorrente da construção das primeiras estradas de rodagem que interligaram as áreas litorâneas com o planalto. As comunidades caiçaras têm importante contribuição histórica e cultural para os saberes relacionados a conservação da biodiversidade, conhecimento da fauna e da flora e sistemas tradicionais de manejo dos recursos naturais de que dispõem. Essas comunidades encontram-se hoje ameaçadas em sua sobrevivência física e material por causa de uma série de processos e fatores, sendo os principais: a especulação imobiliária do litoral, o turismo de massa e as políticas de demarcação de áreas de proteção ambiental.

Não serão discutidos em profundidade esses fatores, pois isso não é objetivo deste estudo, mas é importante se atentar ao fato de que a transformação de espaços de reprodução material e social em parques e reservas naturais resultou em graves limitações à atividades tradicionais dos caiçaras, de agricultura itinerante,

caça, pesca e extrativismo, contribuindo para a emergência de conflitos com os administradores das unidades de conservação e para uma migração ainda maior para as áreas urbanas; os caiçaras, expulsos de seus territórios, a partir da década de 1980 passaram a viver em favelas, fadados ao desemprego e ao subemprego. Observa-se, a partir desses fatores, a intensificação da ocupação não planejada dos subúrbios urbanos.

De acordo com Dias et al. (2015), na Baixada Santista ocorrem alguns processos que têm maior influência na região do presente estudo, sendo eles:

- O desmatamento, que vem ocorrendo desde a colonização e que aumentou com a expansão econômica, mas atualmente ocorre principalmente nas áreas de restingas e no sopé da Serra do Mar.
- A impermeabilização do solo ocorre em quase toda a extensão da Planície, resultante do processo de ocupação urbana.
- A alteração da drenagem é um fenômeno que ocorre principalmente nas áreas de planícies com ocupação urbana, onde existe a canalização da drenagem; ademais, a impermeabilização do solo modifica a dinâmica de escoamento superficial, resultando na mudança da vazão dos rios nas áreas citadas. Outro fenômeno impactante, principalmente na zona de estuário, é o Porto de Santos, onde o trânsito de navios acarreta um assoreamento do canal principal, modificando a dinâmica de deposição de sedimentos nessa área.
- A emissão de efluentes domésticos, que ocorre em áreas de ocupações recentes, áreas de ocupação de encosta e áreas de ocupação irregular, onde se verifica a falta de infraestrutura básica (saneamento, coleta de lixo e arruamento).
- O acúmulo de resíduos sólidos.
- As enchentes e inundações que ocorrem naturalmente nas planícies fluviais e nas zonas de estuários, em consequência do escoamento superficial acumulado nessas áreas. Nas zonas de estuários, a variação da maré também é um fator determinante.

Imagem 1 – Cenário recente de inundação da região de Ponta da Praia, em 21/08/2016.



Fonte: G1 Santos.

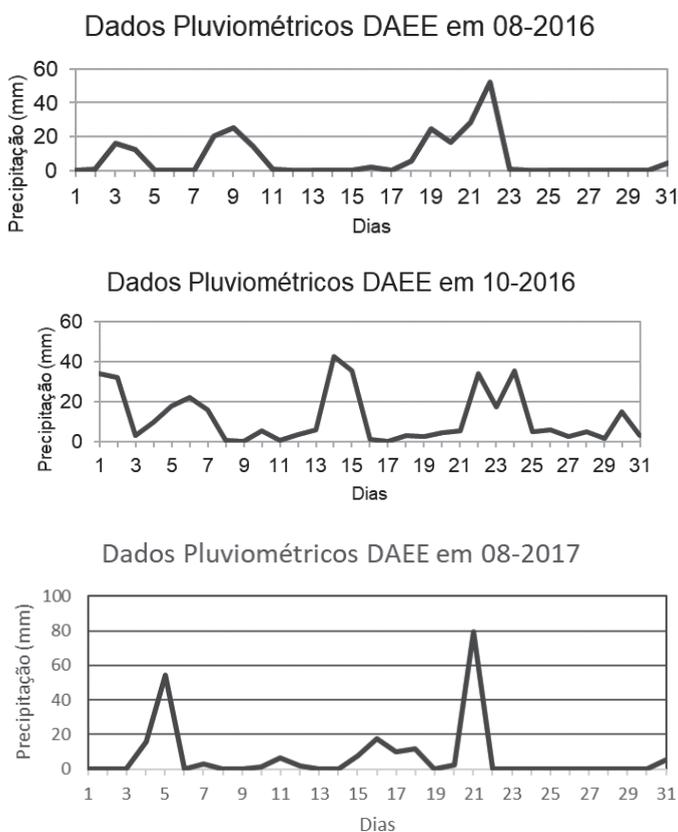
Uma das preocupações da sociedade contemporânea com relação às projeções do clima está relacionada com possíveis mudanças na frequência e na intensidade dos eventos climáticos extremos de curta duração.

Os eventos de precipitação intensa têm importantes efeitos sobre a sociedade, já que alagamentos associados a chuvas excessivas, mesmo que curtas, podem ser os mais destrutivos dentre os eventos extremos nos grandes centros urbanos, principalmente quando associados a efeitos de ressaca do mar (como o evento retratado na Imagem 1 na Ponta da Praia, em 21/08/2016). Projeções feitas pelo IPCC (2007) sobre as alterações dos eventos extremos devido às mudanças climáticas para o fim do século XXI também evidenciam aumento na frequência dos eventos de precipitação intensa sobre a maioria das regiões do planeta, considerando todos os cenários possíveis de emissão de gases estufa na atmosfera. As ressacas em Santos são causadas por diversos fatores em conjunto. As últimas grandes ressacas, ocorridas em 08/2016, 10/2016, 08/2017 e 10/2017, foram causadas por frentes frias vindas do Sul, em conjunto com a maré alta de Lua cheia. Além disso, a urbanização, gerada pela ação antrópica nas margens inundáveis da Ponta da Praia, afeta profundamente a dinâmica costeira que aconteceria na ausência dos edifícios e da cobertura impermeável ali presentes. Essas condições afetam a ocorrência de inundações, agravando sua intensidade.

Deve-se observar também que eventos de inundação marítima podem ser agravados por índices pluviométricos críticos coincidentes. No presente estudo, foram considerados alguns eventos pluviométricos coincidentes com ressacas

que, entretanto, não foram os eventos pluviométricos mais extremos do período estudado (2016-2017). Ainda assim, esses eventos pluviométricos significativos podem ter agravado os cenários de inundação analisados. Na Figura 1, observam-se dados pluviométricos de Santos fornecidos pelo DAEE do posto de Caeté (Prefixo E3-041), localizado em 23° 52,98'S 46° 13,27'W. Os dados pluviométricos apresentados correspondem às chuvas diárias nos meses de agosto e outubro, em 2016 e 2017; nessa figura, encontram-se, portanto, os índices pluviométricos dos dias 19-21/08/2016, 21-25/10/2016, 20-22/08/2017 e 22-27/10/2017, em que ocorreram inundações que são analisadas no presente trabalho.

Figura 1 – Precipitações diárias nos meses de agosto e outubro, em 2016 e 2017, no Posto Caete do DAEE, em Santos.



Fonte: produzida pelo autor com base nos dados fornecidos pelo DAEE (2020).

Assim, fortes ressacas têm sido frequentes em Santos, e sua intensidade vem aumentando nos últimos anos. Tendo em vista os problemas expostos, faz-se necessária a proposta de uma obra de contenção que evite danos de grande magnitude na cidade. Este trabalho utiliza simulações numéricas para embasar

a concepção de uma solução construtiva, de forma que o problema de inundação na região da Ponta da Praia seja contido, visando a proteção do meio ambiente da região, a curto, médio e longo prazos.

De acordo com NSW (2009), para se impedir a inundação de riachos e afluentes de um sistema fluvial principal, podem ser instaladas comportas nos sistemas fluviais de regiões costeiras. A abertura e o fechamento de comportas dependem de mudanças no nível da água causadas por chuvas, inundações ou flutuações das marés.

Saturnino de Brito elaborou um plano de saneamento para Santos com um sistema de canais, que melhorou significativamente o padrão sanitário nas novas áreas urbanizadas (BRITO, 1908, citado por CARRIÇO, 2015). Mas, com a industrialização do Brasil, Santos cresceu aceleradamente, voltando a piorar essas condições de saneamento. Assim, as comportas de Santos passaram a ser abertas somente em caso de precipitações pluviométricas intensas. Contudo, em condições normais, as águas que circulam pelos canais são direcionadas para a Usina Terminal, que passou a receber não apenas a vazão dos esgotos, mas também as águas pluviais conduzidas pelos interceptores.

Essa situação passou a garantir a manutenção de níveis adequados de balneabilidade nos períodos em que as comportas estão fechadas. Mas, após as chuvas e, conseqüente, a abertura das comportas, a qualidade das águas do mar costuma piorar. Portanto, a balneabilidade das praias de Santos está efetivamente associada às precipitações pluviométricas e à operação das comportas, que permitem ou não o transporte da contaminação dos canais para o oceano em um quadro no qual o período mais chuvoso coincide com a temporada de verão e com o maior afluxo de pessoas às praias.

Deve-se salientar que, para o caso de implementação da estrutura de contenção apresentada, deve-se realizar um Estudo de Impacto Ambiental detalhado por profissionais habilitados de cada tipo de impacto, como biólogos, geólogos, geógrafos e engenheiros ambientais.

De acordo com Sanchez (2008), o potencial que determinada obra ou ação humana tem de causar alterações ambientais está ligado a dois fatores: (1) as solicitações que serão impostas ao meio pela ação ou projeto, representadas pela emissão de poluentes, supressão ou adição de elementos ao meio; e (2) o grau de vulnerabilidade do meio, o inverso da resiliência, que, por sua vez, dependerá do estado de conservação do ambiente e das solicitações já impostas a ele, cujos efeitos se acumularam, além da importância do ambiente ou do ecossistema.

Assim, pode-se assumir a seguinte tabela de discussão com relação ao meio ambiente da área de estudo em questão:

Tabela 1 – Principais impactos da obra de contenção.

Elemento	Magnitude	Probabilidade	Duração	Aspectos distributivos	Reversibilidade e potencialidade de adaptação	Descrição
Vegetação Terrestre	Forte	Alta	Temporária de longo prazo	Pontual	Impacto reversível	A vegetação terrestre da área de estudos não é nativa e foi cultivada após a construção do calçadão.
Mangue	Fraca	Baixa	Temporária de longo prazo	Regional	Necessário avaliação específica	A região de mangue e desmatamento do rio é sempre de alta relevância ambiental. A análise ambiental do impacto no mangue deve ser realizada por profissional da área antes de qualquer conclusão quanto à implantação.
Ictiofauna	Fraca	Baixa	Temporária de longo prazo	Regional	Necessário avaliação específica	É próximo ao habitat natural de várias espécies, que servem, inclusive, de alimento para aves, além de serem de grande importância para a população ribeirinha do Góes, na cidade vizinha. Entretanto, a análise ambiental do impacto na ictiofauna deve ser realizada por profissional da área antes de qualquer conclusão quanto à implantação.
Avifauna aquática	Fraca	Média	Temporária de longo prazo	Local	Necessário avaliação específica	Rota de migração.
Avifauna terrestre	Fraca	Média	Temporária de longo prazo	Local	Necessário avaliação específica	Diversas espécies nativas e não nativas presentes.
Lazer e turismo	Alta	Alta	Temporária de longo prazo	Regional	Impacto positivo	O uso atual ocorre em massa e a zona de estudo apresenta atrativos particulares que contribuem para o aumento das atividades turísticas. Há potencial de desenvolvimento, e a implantação de obra de contenção pode favorecer a economia local.
Arqueologia	Fraca	Baixa	Temporária de longo prazo	Local	Necessário avaliação específica	Sítios relativamente raros, entretanto, elemento importantíssimo para a história local, para a história do país e do mundo, tendo em vista as características da formação da cidade de Santos e as populações ancestrais. Mas a obra não impedirá a realização de trabalhos arqueológicos em larga escala.

Fonte: produzida pelo autor com base em Sanchez (2008).

2. METODOLOGIA

Séries temporais de nível do mar e de dados meteorológicos na região costeira de Santos foram analisadas por Harari e Camargo (1995), Campos, Camargo e Harari (2010), Harari, França e Camargo (2013) e Magini, Harari e Abessa (2007).

As análises de séries temporais permitiram obter informações sobre as variabilidades do nível do mar e a grande influência das condições meteorológicas, de modo a estabelecer as causas das fortes ressacas em Santos – especialmente os sistemas frontais intensos em períodos de maior amplitude das marés, nos períodos de sizígia, os quais ocorrem quando Lua e Sol estão em conjunção ou oposição, em épocas de Lua Cheia ou de Lua Nova.

Outra causa para as graves ressacas que têm ocorrido em Santos é o aumento do nível médio do mar devido às mudanças climáticas. Se confirmadas as projeções para as mudanças do clima global no futuro, os impactos poderão ser potencialmente irreversíveis; nesse caso, os países insulares e as regiões urbanas costeiras são as mais vulneráveis, com possibilidades reais de inundação a médio e a longo prazos.

Com os avanços da ciência da computação e a vulnerabilidade dos ambientes marinhos costeiros, a modelagem de processos dinâmicos costeiros tem sido muito desenvolvida, propiciando o uso de modelos numéricos para previsões e reprodução de fenômenos. É importante ressaltar que, para se aplicar um modelo numérico, devem-se levar em conta os processos que atuam nos fenômenos que se quer estudar, tendo em vista a compatibilidade das equações utilizadas no modelo e dos erros ou incertezas, para que o resultado seja o mais próximo possível da realidade e seja útil para a aplicação a que se destina.

Para a região costeira do Estado de São Paulo, modelos numéricos da circulação permitiram estabelecer os padrões de correntes costeiras nos períodos de ressacas, com fortes intrusões de transportes na plataforma vindos de Sudoeste, sendo esses os principais responsáveis pela elevação do nível médio do mar.

No presente trabalho, foi implementado modelo da região costeira de Santos por meio do software Delft3D, que forneceu valores de nível do mar (em metros), de componentes de correntes (em m/s) e intensidade de correntes (em m/s). O modelo foi processado para um período de 2 anos, de janeiro de 2016 a dezembro de 2017, com a obtenção de valores de nível do mar e de correntes em intervalos horários. Neste trabalho, foi escolhido o mês de agosto de 2016 para apresentação dos resultados das simulações. A partir dos resultados dos processamentos, foram escolhidos 5 “pontos de observação” para análise de séries temporais geradas pelo modelo, segundo distâncias gradativamente afastadas da costa a partir da Ponta da Praia, com o objetivo de acompanhar a evolução dos campos hidrodinâmicos

com a proximidade da costa. Além dos 5 pontos de observação, foi selecionada uma secção contínua de pontos de grade nas proximidades da Ponta da Praia, para análise detalhada dos resultados de modelagem. Os resultados do modelo foram representados na forma gráfica por meio do Quickplot do Delft3D.

Inicialmente, foram realizados processamentos em 2D para a obtenção de correntes verticalmente integradas, considerando somente as forçantes de maré.

Em seguida, foram realizadas simulações em 3D, em 15 camadas sigma, utilizando dados meteorológicos do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) produzidos pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR), do National Center for Environmental Prediction (NCEP), versão v2. Dados de nível médio do mar e perfis de temperatura e salinidade, nas bordas da grade, foram especificados a partir de resultados do modelo global oceânico europeu CMEMS – Copernicus Marine Environment Monitoring Service.

Além dos processamentos hidrodinâmicos, o Modelo Delft3D foi utilizado para simulações da propagação de ondas de superfície a partir de condições de contorno de modelos globais do CMEMS e dos dados meteorológicos do CFSR. Esses processamentos forneceram os parâmetros das ondas e a força induzida das ondas de superfície (em N/m^2).

A partir da modelagem hidrodinâmica e das ondas, foram obtidos dados das forçantes sobre estruturas a serem posicionadas para a contenção de inundações, visando os cálculos preliminares dessas estruturas.

Para fazer as verificações de resistência da estrutura projetada neste trabalho, foram considerados 3 cenários principais, sendo consideradas as Normas Brasileiras de Ações e Segurança nas Estruturas (NBR 8681/2004) e de Forças Devidas ao Vento em Edificações (NBR 6123/1988). Em todos os cenários, a força de subpressão do solo sobre a estrutura deve ser considerada no cálculo de resistência da caixa do pistão, e são utilizados os coeficientes de ponderações das normas.

3. RESULTADOS

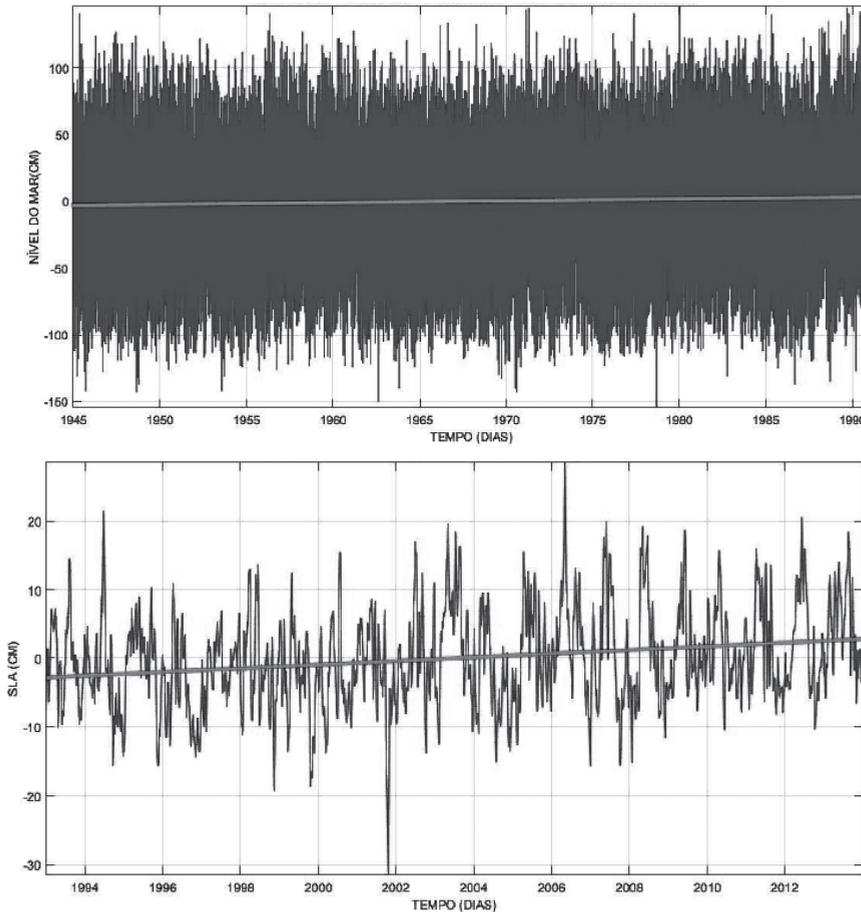
As análises de séries temporais permitiram obter informações sobre as variabilidades do nível do mar e a grande influência das condições meteorológicas, de modo a estabelecer as causas das fortes ressacas em Santos – especialmente os sistemas frontais intensos em períodos de maior amplitude das marés, nos períodos de sizígia, os quais ocorrem quando Lua e Sol estão em conjunção ou oposição, em épocas de Lua Cheia ou de Lua Nova.

Outra causa para as graves ressacas que têm ocorrido em Santos é o aumento do nível médio do mar devido às mudanças climáticas. Se confirmadas as projeções para as mudanças do clima global no futuro, os impactos poderão ser

potencialmente irreversíveis; nesse caso, os países insulares e as regiões urbanas costeiras são as mais vulneráveis, com possibilidades reais de inundação a médio e a longo prazos.

O estudo de Harari e Camargo (1995) compreendeu a análise da série temporal de nível do mar obtida de 1945 a 1990 por meio de marégrafo, e o trabalho de Harari, França e Camargo (2013) envolveu a série de 1993 a 2013, medida a partir de satélites altimétricos (Figura 2). Observa-se que a tendência de aumento do nível do mar para o período de 1945 a 1990 foi de $+0,13 \pm 0,03$ cm/ano, enquanto, para o período de 1993 a 2014, foi de $+0,27 \pm 0,06$ cm/ano.

Figura 2 – Séries temporais de nível do mar (em azul, em cm) e sua tendência (em vermelho, em cm/ano). Parte superior: de 1945 a 1990, dados obtidos por meio de marégrafo em Santos; parte inferior: de 1993 a 2013, dados obtidos por meio de satélites altimétricos na região costeira adjacente a Santos.



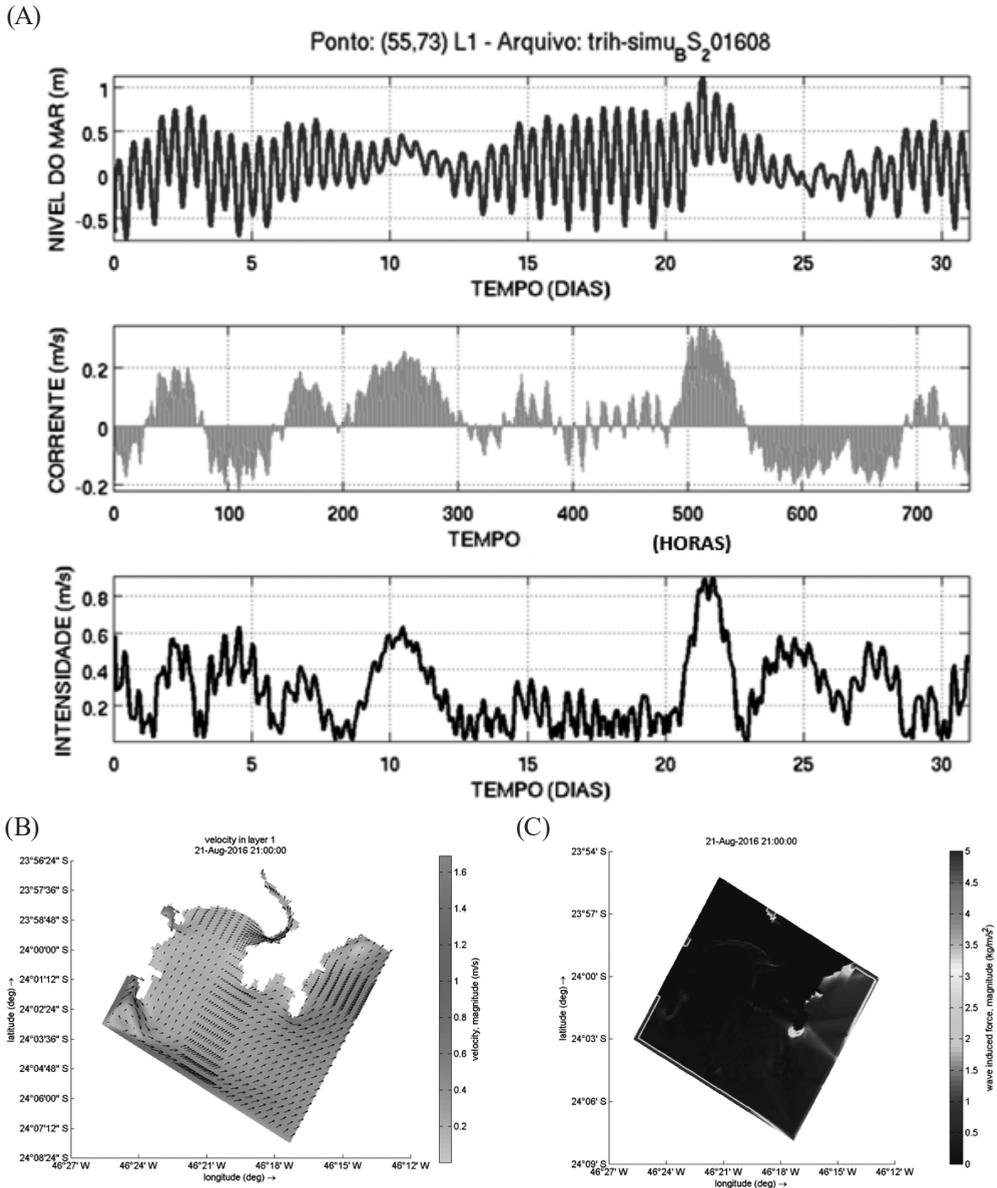
A taxa de aumento do nível do mar no período de 1993 a 2014 foi bem maior que a de 1945 a 1990; pode-se inferir que isso ocorreu devido ao fato de a taxa ter sido muito pequena nas décadas de 1940 e 1950; a partir daí, os efeitos de variações climáticas se tornaram muito mais acentuados; deve-se notar que a série do marégrafo é horária e a de altimetria é diária. De qualquer forma, essas taxas de aumento do nível médio do mar indicam que a poluição atmosférica, a urbanização e a impermeabilização do solo vêm sendo agravados nas últimas décadas.

Essa breve análise de elevação de nível médio do mar pode servir de ponto de partida para novos trabalhos sobre as causas do aumento do nível do mar. Além de analisar efeitos do aquecimento global, são necessários estudos detalhados locais, como as concentrações de CO₂ na região, efeitos de obras de engenharia, entre outros.

3.1. Resultados de modelo

A partir das séries temporais nos pontos de observação estabelecidos, foi possível escolher os melhores períodos de análise de níveis extremos positivos e negativos no período analisado. Na Figura 3, encontram-se as séries temporais de nível do mar e de correntes para o ponto (55,73), próximo à Ponta da Praia, no decorrer de agosto de 2016. Nesse mês, os dias 20 e 21 apresentaram elevações máximas, com valores de nível médio do mar acima de 0,70 m, que causaram pontos de inundação e danos aos patrimônios público e privado; foram calculados os valores de 0,8 m no dia 21/08/2016, às 18h, e 1,2 m às 5h e às 6h do dia 22/08/2016 (-3h GMT). Na Figura 3 são também apresentados os mapas das correntes e das ondas de superfície no dia 21 de agosto, às 18h (-3h GMT).

Figura 3 – (A): Séries temporais de resultados do modelo de nível do mar (em metros), vetores das correntes (m/s) e intensidade das correntes (m/s) no ponto de observação (55,73) em agosto de 2016. (B): Mapa de resultados de vetores de corrente do modelo numérico para o dia 21 de agosto de 2016 (18h, -3GMT), na camada de superfície (em m/s). (C): Mapa de resultados do modelo numérico para a força induzida das ondas de superfície (em N/m²) para o dia 21 de agosto de 2016 (18h, -3GMT).



Fonte: produzida pelo autor a partir do software Delft3D.

Na seção de resultados próximo à Ponta da Praia, foram analisados os perfis verticais de propriedades calculadas pelo modelo. Observou-se uma marcante influência do canal de navegação do Porto de Santos; como essa área tem dragagens periódicas, os resultados apresentados representam a situação encontrada especificamente no dia analisado. Dentre os perfis verticais de variáveis calculados pelo modelo na região próxima à Ponta de Praia, a pressão hidrostática é de particular importância; valores em torno de 20.000 kg/m^2 , próximo à superfície, devem ser considerados no projeto de contenção de inundação.

Quanto à simulação de ondas, pode-se observar, por meio dos resultados obtidos, que as ondas, na parte mais externa da grade, chegaram a até 4,5 m de altura significativa; entretanto, próximo à região onde se almeja construir a estrutura de contenção das inundações, na Ponta da Praia, foram obtidos valores máximos de 1,5 m, aproximadamente.

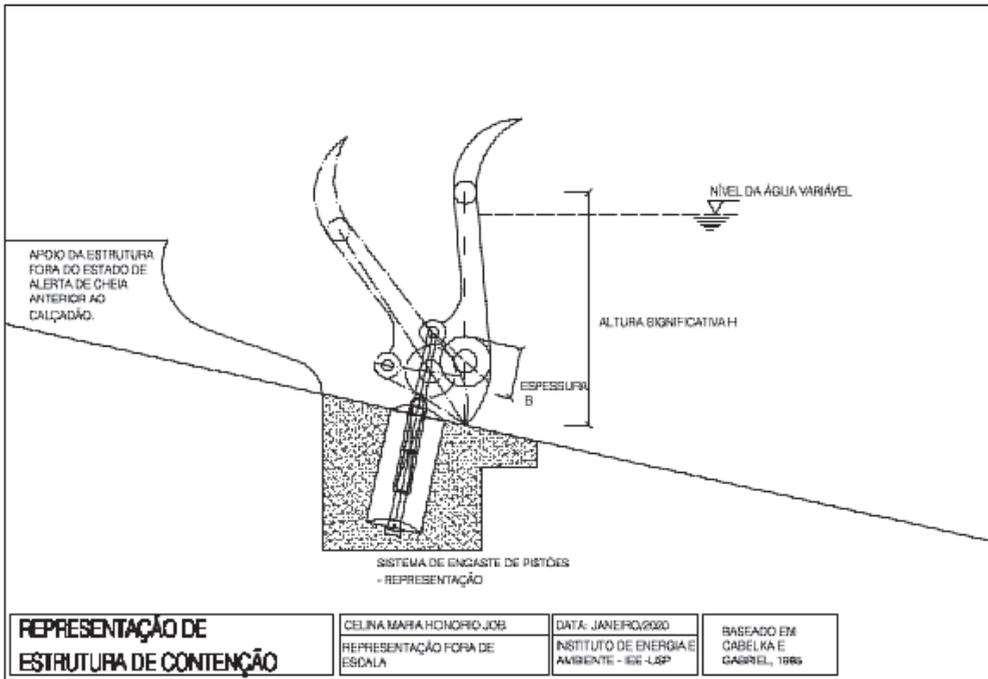
Finalizando as análises de modelagem, os resultados do Delft3D considerados na concepção de projeto de contenção de inundações foram: força induzida de ondas (N/m^2), transporte de energia (W/m), altura significativa das ondas (m), dissipação de energia (N/m^2) e velocidade das correntes (m/s).

Sempre que possível, os resultados de modelagem foram comparados com medições independentes. Como exemplo, a comparação de séries temporais de nível do mar do Delft3D com resultados do modelo global HYCOM, em ponto próximo à Ponta da Praia, forneceram a média das diferenças de 0,041 m e desvio padrão de 0,101 m; o coeficiente de correlação linear entre essas séries foi de 0,824, com significância de 0,023; o erro absoluto médio entre as séries foi de 0,08 m, correspondente a 9,4%; e o parâmetro skill de comparação de Wilmott foi de 0,936.

3.2. Cenários de solicitação da estrutura de contenção

Para fazer as verificações de resistência da estrutura projetada neste trabalho (Figura 4), foram considerados 3 cenários principais, sendo consideradas as Normas Brasileiras de Ações e Segurança nas Estruturas (NBR 8681/2004) e de Forças Devidas ao Vento em Edificações (NBR 6123/1988). Em todos os cenários, a força de subpressão do solo sobre a estrutura deve ser considerada no cálculo de resistência da caixa do pistão, e são utilizados os coeficientes de ponderações das normas. Nas apresentações a seguir, é considerado o sentido positivo dos vetores da direita para a esquerda, para baixo e no sentido horário.

Figura 4 – Projeto final de contenção marítima a ser implantado.



Fonte: produzida pelo autor no software AutoCAD.

3.2.1. Cenário C1

Primeiro cenário, C1: quando a estrutura está em posição de cheia, em caso de cheia eminente, mas ainda não há inundação, então ela é forçada apenas pela força dos ventos.

COMBINAÇÕES NORMAIS

VERTICAL

$$\text{Sentido positivo: } S_d = 1,0 \cdot P \quad (1)$$

P = peso próprio da estrutura em N

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \text{sen}45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} \quad (2)$$

$F_{\text{pistão}}$ = força resistente do pistão em N por metro de estrutura

HORIZONTAL

$$\text{Sentido positivo: } S_d = 1,25 \cdot P + 1,5 \cdot S + 1,4 \cdot 0,6 \cdot F_{\text{vento-sobrepessão}} \quad (3)$$

S = força de atrito em N

$F_{\text{vento-sobrepressão}}$ = força do vento de sobrepressão em N para cada metro de estrutura

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \cos 45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} + 1,4 \cdot F_{\text{vento-sucção}} \quad (4)$$

$F_{\text{vento-sucção}}$ = força do vento de sucção em N para cada metro de estrutura

TOMBAMENTO

$$M_{T_s} = F_a \cdot (-0,08H^2 + 0,18H^2) + S \cdot 0,6H \quad (5)$$

$$FS = M_{T_r} / M_{T_s} \geq 1,5 \quad (6)$$

$$FS = \frac{\gamma_{\text{aço}} \cdot B \cdot (-0,6H + 0,4H)}{F_{\text{vento-sobrepressão}} \cdot (-0,08H^2 + 0,18H^2) + S \cdot 0,6H} \quad (7)$$

M_{T_s} = momento de tombamento solicitante em N.m

$F_{\text{vento-sobrepressão}}$ = força de arrasto do vento de sobrepressão a cada metro de estrutura em N

S = força de atrito em N

3.2.2. Cenário C2

Segundo cenário, C2: quando a estrutura está em posição de cheia, em caso de cheia em transição, há inundação em parte da estrutura, então ela é forçada pela força dos ventos na parte não inundada e pela pressão hidrostática junto com a forçante de ondas na parte inundada.

COMBINAÇÕES ESPECIAIS

VERTICAL

$$\text{Sentido positivo: } S_d = 1,0 \cdot P \quad (8)$$

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \sin 45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} \quad (9)$$

A força que deve resistir ao impacto v

HORIZONTAL

Sentido positivo:

$$S_d = 1,15 \cdot P + 1,3 \cdot S + 1,3 F_{\text{wf}} + 1,3 \cdot F_{\text{ph}} + 1,2 \cdot 0,6 + F_{\text{vento-sobrepressão}} \quad (10)$$

F_{wf} = força induzida de ondas para cada metro de estrutura (em N para cada metro de estrutura)

F_{ph} = força produzida pela pressão hidrostática exercida em área da estrutura (em N para cada metro de estrutura)

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \cos 45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} + 1,4 \cdot F_{\text{vento-sucção}} \quad (11)$$

TOMBAMENTO

$$M_{Ts} = -0,08H^2 F_{\text{sobrepressão}} + W_f \cdot 0,18H^2 + 0,06P_h \cdot H^2 + S \cdot 0,6H \quad (12)$$

$$M_{Tr} = (P + F_{\text{sucção}}) \cdot (-0,08H^2 + 0,18H^2) \quad (13)$$

$$FS = \frac{0,1H \cdot (P + F_{\text{sucção}})}{0,16H \cdot (F_{\text{sobrepressão}} + W_f + P_h) + 0,6S} \quad (14)$$

3.2.3. Cenário C3

Terceiro cenário, C3: quando a estrutura está em posição de cheia, em caso de cheia completa, na qual há inundação total, então ela é forçada pela pressão hidrostática junto com a forçante de ondas na parte inundada.

COMBINAÇÕES EXEPCIONAIS

VERTICAL

$$\text{Sentido positivo: } S_d = 1,0 \cdot P \quad (15)$$

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \sin 45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} \quad (16)$$

A força que deve resistir ao impacto v

HORIZONTAL

$$\text{Sentido positivo: } S_d = 1,0 \cdot P + 1,0 \cdot S + 1,0W_f + 1,0P_h \quad (17)$$

$$\text{Sentido negativo: } S_d = 1,0 \cdot \cos 45^\circ \cdot F_{\text{pistão}} + 1,4 \cdot F_{\text{vento-sucção}} \quad (18)$$

TOMBAMENTO

$$M_{Ts} = W_f \cdot (0,18H^2 - 0,08H^2) + P_h \cdot (0,15H^2) + S \cdot 0,6H \quad (19)$$

$$M_{Tr} = (P + F_{\text{sucção}}) \cdot (-0,08H^2 + 0,18H^2) \quad (20)$$

$$FS = \frac{0,1H \cdot (P + F_{\text{sucção}})}{0,1H \cdot F_{wf} + 0,15H \cdot F_{ph} + 0,6S} \quad (21)$$

4. CONCLUSÕES

Como solução para o problema das inundações na região da Ponta da Praia em Santos, este trabalho analisou a viabilidade técnica da construção de um sistema de contenção de inundações, com painéis colocados em valas na linha não influenciada por mudanças geomorfológicas dos sedimentos da praia, próximo ao

calçadão, e que seriam erguidos com o acionamento de pistões pneumáticos em caso de grandes elevações do nível do mar (JOB, 2020).

A partir dos resultados das simulações numéricas no período de 2 anos (janeiro de 2016 a dezembro de 2017), foram obtidas as ordens de grandeza dos eventos críticos para a obra de contenção proposta. São elas: a força causada pela pressão hidrostática de $F_{ph} = 60$ kN, a força induzida de ondas a cada metro de estrutura $F_{wf} = 5$ kN, a força de arrasto do vento no dia da cheia $F_a = 0,253$ kN e a altura significativa de ondas a ser considerada a favor da segurança e da economia $H = 2$ m (para o cenário específico de cheia). As forças de subpressões e de atrito e o peso próprio da estrutura são dependentes da espessura da placa empregada, que deve ser obtida por meio de análise estrutural, o que não faz parte do objetivo deste trabalho.

Deve-se ressaltar que podem ocorrer extremos positivos mais intensos que os considerados, se analisado um período maior; de fato, em caso de real implantação do projeto, deve-se considerar um período maior de simulação numérica hidrodinâmica e de ondas, para a obtenção de dados extremos mais precisos.

Ademais, este estudo mostrou a tendência de elevação de nível do mar na região de Ponta da Praia Santos a partir dos dados de marégrafo e de altimetria de satélite. É importante a utilização dessas informações em futuros trabalhos, incluindo investigações mais profundas das causas dessa elevação.

O custo da estrutura de contenção não será pequeno e dependerá principalmente da abrangência em extensão a ser adotada na região de Ponta da Praia, que, por sua vez, dependerá da extensão das inundações calculadas pelos estudos específicos de implantação. Entretanto, a estrutura proposta é um investimento de proteção da população, da infraestrutura e da economia local, sendo totalmente plausível para uma prefeitura do porte da cidade de Santos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as re-análises do modelo do NCEP no Sudoeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, pp. 175-184, 2010.

CARRIÇO, J. M. O Plano de Saneamento de Saturnino de Brito para Santos: construção e crise da cidade moderna. IAU – USP, **Revista de Pesquisa em Arquitetura**, 2015.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica – Versão: 180626.1. Acesso em: 2020. <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>

DIAS, R. L.; BACC, P. H.; OLIVEIRA, R. C. Santos. In: CUNHA, C. M. L.; OLIVEIRA, R. C. (orgs.). **Baixada Santista: uma contribuição à análise geoambiental** [online]. São Paulo: Editora UNESP, pp. 91-116. ISBN 978-85-68334-55-3, 2015.

DIEGUES, A. C. (org.); ARRUDA, R. S. V.; SILVA, V. C. F. S.; FIGOLS, F. A. B.; ANDRADE, D. **Os Saberes Tradicionais e a Biodiversidade no Brasil**. São Paulo, MMA/COBIO/NUPAUB/USP, 2000, 211 p.

HARARI, J.; CAMARGO, R. **Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989**. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, n. 36, 15 p., 1995.

HARARI, J.; FRANÇA, C. A. S.; CAMARGO, R. Long – term variability of tidal and mean sea level components on the Brazilian coast. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31 (supl. 1), pp. 49-52, 2013.

IBGE. **Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2017**. [notas metodológicas]. 11p. Disponível somente em meio digital: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100923.pdf>, Rio de Janeiro, 2017.

IBGE. Diretoria de Pesquisas. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020 – DPE** – Coordenação de População e Indicadores Sociais – COPIS, 2020.

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

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, Monografias, n. 6, v. I-II, 1981.

JOB, C. M. H. **Simulação numérica de solução construtiva para contenção de inundações de origem marítima na Ponta da Praia, em Santos, com mínimo impacto ambiental**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, <https://doi.org/10.11606/D.106.2020.tde-17072020-132822>, 180 p., 2020.

MAGINI, C.; HARARI, J.; ABESSA, D. M. S. Circulação recente de sedimentos costeiros nas praias de Santos durante eventos de tempestades: dados para a gestão de impactos físicos costeiros. **Geociências**, v. 26(4), pp. 349-355, 2007.

NSW Department of Industry and Investment. **Water Control Structures: Design Suitability for Natural Resource Management on Coastal Floodplains**. Department of Industry and Investment (Aquatic Habitat Rehabilitation), Port Stephens, 2009.

SANCHEZ, L. H. **Avaliação de impacto ambiental: Conceitos e métodos**. São Paulo, 3. ed., Oficina de textos, 2008.

WEBER, M. **The City**. 1921, Glencoe, Illinois – Free Press, 1986.

ZÜNDDT, C.; CUNHA, J. M. P. da et al. **Baixada Santista: uso, expansão e ocupação do solo, estruturação de rede urbana regional e metropolização**. Expansão metropolitana, mobilidade espacial e segregação nos anos 90. Campinas: Núcleo de Estudos de População-Nepo/Unicamp; 2011.

