



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Kelly Kawai Venancio

**Evolução hidromorfodinâmica da região da Ponta da
Praia em Santos – SP, no período entre 2009 e 2017**

CAMPINAS
2018

Kelly Kawai Venancio

Evolução hidromorfodinâmica da região da Ponta da Praia em Santos – SP, no período entre 2009 e 2017

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Co-orientadora: Profa. Dra. Patrícia Dalsoglio Garcia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA KELLY KAWAI VENANCIO E ORIENTADA PELO PROF. DR. TIAGO ZENKER GIRELI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

V551e Venancio, Kelly Kawai, 1991-
Evolução hidromorfodinâmica da região da Ponta da Praia em Santos-SP, no período entre 2009 e 2017 / Kelly Kawai Venancio. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Tiago Zenker Gireli.
Coorientador: Patricia Dalsoglio Garcia.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Erosão de praias. 2. Erosão costeira. 3. Hidrodinâmica. 4. Engenharia hidráulica. I. Gireli, Tiago Zenker, 1980-. II. Garcia, Patricia Dalsoglio. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Hydromorphodynamic evolution of the Ponta da Praia region in Santos-SP, in the period between 2009 and 2017

Palavras-chave em inglês:

Erosion of beaches

Coastal erosion

Hydrodynamics

Hydraulic engineering

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Tiago Zenker Gireli [Orientador]

Jorge Luiz Alves Trabanco

Celia Regina de Gouveia Souza

Data de defesa: 05-02-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**Evolução hidromorfodinâmica da região da Ponta da
Praia em Santos – SP, no período entre 2009 e 2017**

Kelly Kawai Venancio

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli
Presidente e Orientador/FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco
FEC/UNICAMP

Profa. Dra. Celia Regina de Gouveia Souza
FFLCH/USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da aluna.

Campinas, 05 de fevereiro de 2018

*Dedico este trabalho ao meu irmão
Reinaldo (in memoriam):*

*“His spirit is like the wind,
The angel guarding me,
I know he is watching over me”*

Meus agradecimentos

Aos professores Tiago e Patrícia, pela orientação, motivação, apoio e confiança, sem os quais o desenvolvimento deste trabalho não seria possível.

Aos técnicos de laboratório por toda ajuda com as coletas e os processamentos de dados.

Aos colegas de pesquisa pela ajuda com os trabalhos de campo e apoio para desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Celia e Trabanco por todos os comentários, sugestões, correções e elogios durante o exame de qualificação, que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Ao Eduardo da secretaria de pós-graduação por todo o auxílio com as infinitas documentações, informações e regras do programa.

À minha mãe Eliana, que tanto me apoiou e me incentivou ao longo dessa caminhada, ajudando a enfrentar e superar obstáculos e não permitiu que eu desistisse.

Ao meu pai Reinaldo, que apesar de todas as dificuldades demonstrou todo o seu apoio.

Aos familiares, que nos momentos de minha ausência, dedicados a minha carreira, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Aos meus amigos, que tanto me apoiam e se fazem presentes em minha vida, sem os quais eu não seria metade do que sou hoje, e tornam esta jornada muito mais colorida e divertida. Amigos são a família que a gente escolhe.

“As ondas quebravam-se, esparramando agilmente suas águas sobre a praia. Uma após a outra, amontoavam-se e desabavam; com a força da queda os respingos voltavam-se sobre si mesmos. As ondas eram de um macerado azul-profundo, exceto pelo desenho dos diamantes em seus dorsos, que fremiam como dorsos de grandes cavalos que vibram os músculos quando se movem. As ondas tombavam; recuavam e tombavam novamente, como o baque surdo de um grande animal pateando”.

As Ondas, Virginia Woolf

RESUMO

O processo erosivo em andamento na região da Ponta da Praia em Santos, município mais relevante da Região Metropolitana da Baixada Santista, tem se acentuado consideravelmente nos últimos anos. Além de perdas expressivas de extensão da faixa de areia, houve um aumento do número de ressacas que, ao encontrarem um menor ambiente de amortecimento para as ondas (isto é, grandes faixas de areia que dissipariam a energia das ondas), acabam trazendo grandes prejuízos às estruturas urbanas da região. Com isso, durante esses eventos, é frequente o alagamento de ruas, avenidas e calçadas, e a destruição de muros e muretas. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, com base em dados remotos e levantamentos de campo do período entre 2009 e 2017, a erosão progressiva na região da Ponta da Praia em Santos. Objetiva-se, também, o levantamento histórico das principais intervenções antrópicas na região de estudo, a avaliação do emprego de modelos matemáticos espectrais em locais onde há efeitos da difração e reflexão, e análise das alterações hidrodinâmicas em função de mudanças topobatimétricas. Para isso, fez-se uso de modelos digitais de elevação, no processamento de dados de campo, e modelagens matemáticas para simulação da hidrodinâmica e dos efeitos de ondas na região da Ponta da Praia, considerando o cenário após o alargamento e aprofundamento do canal do Porto de Santos. Obteve-se por fim, que a retrogradação da linha de costa está mais acentuada desde o ano de 2010, o que gerou recuos de até 57 metros, enquanto que a modelagem numérica apontou para alterações na hidromorfodinâmica junto à orla da ponta da praia, estas geradas pelas mudanças batimétricas do canal do porto e do perfil praial, resultando em ondas mais elevadas e maiores velocidades de correntes. Esses aspectos, em conjunto, indicam a permanência do processo erosivo.

Palavras-chave: erosão costeira; hidromorfodinâmica costeira; modelagem numérica; Ponta da Praia; Santos (SP).

ABSTRACT

The erosive process at Ponta da Praia in Santos has increased over the last years. Besides significant losses in extension of sand beach, frequency of storm surges has been higher resulting in structural damages in avenues, streets, sidewalks, and walls used to protect the beachfront infrastructure. With smaller sand area, waves from storm surges do not dissipate enough energy and, consequently, carry considerable destructive power over the constructions. Considering this context, this work aims to evaluate the progressive erosion in the region of Ponta da Praia in Santos based on remote data and field data from the period between 2009 and 2017. This work has also the purpose to analyze the main anthropogenic interventions in the region of study, to evaluate the use of spectral mathematical models in locations where effects of diffraction and reflection are relevant, and to analyze hydrodynamic changes as a function of topobathymetric changes. To achieve this objective, digital elevation models for field data processing were used, and a mathematical model to simulate hydrodynamics and wave effects in the Ponta da Praia region was applied considering the scenario after the enlargement and deepening of the Port of Santos channel. Finally, it was concluded that the coastline retreat has been more pronounced since 2010, generating up to 57 meters retreats. The numerical model indicated changes in hydromorphodynamics near the edge of the beach, which were generated by the bathymetric changes of the port channel and the beach profile. It resulted in higher waves and higher current velocities. These aspects combined indicate the permanence of the erosive process.

Keywords: coastal erosion; coastal hydromorphodynamics; numerical modeling; Ponta da Praia; Santos (SP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Refração das ondas.	24
Figura 2. Refração de ondas na Praia do Centro em Caraguatatuba, São Paulo – Brasil.....	25
Figura 3. Difração das ondas ao passarem pela obra de abrigo do Porto de Mucuripe em Fortaleza, Ceará - Brasil.	25
Figura 4. Reflexão de ondas devido à presença de obras de proteção costeira em Santos, São Paulo - Brasil.	26
Figura 5. Quatro tipos de arrebentação: (a) vista em perspectiva e (b) seção transversal.	27
Figura 6. Onda gigante arrebentando em praia do Havaí.....	28
Figura 7. Diversos métodos para medição de dados de onda.....	29
Figura 8. Boia Santos do programa PNBOIA.	30
Figura 9. Definição dos termos do sistema praias. MHWL: média das preamares; MSL: nível médio do mar; MLWL: média das baixa-mares.	32
Figura 10. Estágios praias para o caso de ondas construtivas (à esquerda) e erosivas (à direita).	33
Figura 11. Esquema dos tipos de transporte de sedimentos litorâneo.	34
Figura 12. Exemplo de interferência no transporte longitudinal de sedimentos por obras de engenharia: canal de drenagem pluvial 6, Santos - SP.	35
Figura 13. Alterações do perfil transversal da praia ao longo do ano.	37
Figura 14. Perfil praias com variação morfológica e ilustração da profundidade de fechamento, considerando praias arenosas.....	38
Figura 15. Derivação das forças geradoras da maré.....	39
Figura 16. Marés de Sizígia e Quadratura.....	40
Figura 17. Parâmetros característicos das variações de maré.	41
Figura 18. Trecho final do complexo lagunar-estuarino de Cananéia, São Paulo – Brasil e localização da sua embocadura.....	42
Figura 19. Exemplos de muros de praia utilizando a preamar média de sizígia (MHWS) como referência.....	45
Figura 20. Muro de praia em pedra argamassada combinado com enrocamentos, Santos, São Paulo - Brasil.	45

Figura 21. Exemplos de revestimentos utilizando a preamar média de sizígia (MHWS) como referência.....	46
Figura 22. Revestimento em enrocamento para complementar o muro de praia em pedra argamassada, Santos, São Paulo – Brasil.	47
Figura 23. Espigões costeiros em Fortaleza, Ceará – Brasil.	48
Figura 24. Resposta da linha de costa a quebra-mares destacados.	49
Figura 25. Quebra-mares destacados implementados em Olinda, Pernambuco - Brasil.....	50
Figura 26. Locais da área costeira para depósito de areia utilizada na alimentação artificial, NM: nível médio do mar.	51
Figura 27. Condições de equilíbrio necessárias para praias alimentadas artificialmente, visando obter uma largura de praia adicional (Δw) com o material de empréstimo para sedimentos mais finos (acima) e mais grosseiros (abaixo) que o natural.....	52
Figura 28. Praia de Copacabana, Rio de Janeiro – Brasil, antes da alimentação artificial de praia.....	53
Figura 29. Praia de Copacabana, Rio de Janeiro – Brasil, depois do engordamento artificial de praia.....	53
Figura 30. Localização da RMBS.	58
Figura 31. Localização das intervenções na região da Baixada Santista. 1: canais de drenagem do 1 ao 6 (da esquerda para a direita); 2: tómbolo da Ilha Porchat; 3: enraizamento do Emissário Submarino; 4: canal de acesso ao Porto de Santos; 5: muros de praia, enrocamentos e muretas na região da Ponta da Praia.	59
Figura 32. Planta do sistema de canais de drenagem pluvial em Santos, projeto de Saturnino de Brito.	60
Figura 33. Planta de expansão de Santos de 1910, projeto de Saturnino de Brito. ..	61
Figura 34. Jardim de orla em meados de 1930/1940, região dos canais 2 e 3. Ao fundo é possível ver a Ilha de Urubuqueçaba.	62
Figura 35. Jardim de orla na década de 1960.	63
Figura 36. Vista aérea do Aquário Municipal e da Ponta da Praia, 1962.	64
Figura 37. Vista aérea da Ilha Porchat, São Vicente.	65
Figura 38. Plataforma do Emissário Submarino em meados dos anos 1980.....	66

Figura 39. Vista aérea da plataforma do Emissário Submarino e da Ilha de Urubuqueçaba.	66
Figura 40. Parque Roberto Mário Santini sobre a plataforma do Emissário Submarino.	67
Figura 41. Localização dos pontos de despejo de dragagem do Porto de Santos....	68
Figura 42. Distribuição anual do número de ressacas.	69
Figura 43. Localização do Sistema Estuarino de Santos e suas subdivisões.	72
Figura 44. Descalçamento de estruturas urbanas nas proximidades na região da Ponta da Praia. 1: fotos obtidas em 06 de julho de 2010; 2: fotos obtidas em 13 de setembro de 2010. 3: fotos obtidas em 13 de novembro de 2010.	73
Figura 45. Região da Ponta da Praia em frente ao Aquário Municipal.	74
Figura 46. a) velocidade das correntes (m/s) e b) batimetria na região da embocadura do Estuário Santista.	77
Figura 47. Batimetria aplicada no estudo da alteração prismas de maré devido a mudanças batimétricas e implantação de novos terminais portuários.	78
Figura 48. Localização dos perfis de monitoramento praiial do estudo de FUNDESPA (2010, 2011, 2013, 2014).	79
Figura 49. Sentindo do transporte sedimentar residual na região da Ponta da Praia em 2013.	79
Figura 50. Propagação de ondas na região de estudo extraída do modelo SWAN. .	80
Figura 51. Modelo de Transporte de sedimentos, para região de estudo, obtido pela ferramenta DELFT3D.	81
Figura 52. Poligonal do levantamento topográfico.	83
Figura 53. Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita).	84
Figura 54. Régua da estação maregráfica de Torre Grande em Santos, São Paulo, Brasil.	85
Figura 55. Seções levantadas no trecho entre o Canal 4 e STOS-19.	87
Figura 56. Seções levantadas no trecho entre a STOS-19 e a extremidade da praia.	88
Figura 57. Levantamento topográfico utilizando Estação Total.	89
Figura 58. Ecobatímetro utilizado para coleta de dados de campo.	89
Figura 59. Levantamento batimétrico em execução.	90

Figura 60. Coleta de perfis batimétricos em tempo real por meio do software HYDROpro Navigation®, da Trimble.....	91
Figura 61. Exemplo de superfície de nível referente ao levantamento 06 de fevereiro de 2015.....	92
Figura 62. Captura de tela do software HYDROpro NavEdit® para processamento de dados, com indicação do marégrafo e sentido de entrada do canal de acesso ao Porto.....	93
Figura 63. Captura de tela para exemplo de utilização da ferramenta Sun Position.	94
Figura 64. Captura de tela do <i>software</i> AutoCAD Civil 3D® utilizado para a geração dos MDE.....	96
Figura 65. Batimetria original.	101
Figura 66. Recorte do modelo original utilizado na segunda etapa de simulação... ..	102
Figura 67. Captura de tela de setup do módulo SW.	105
Figura 68. Georreferenciamento da imagem obtida pelo Google Earth® para o dia 28/09/2016 no MDE do levantamento de campo de 15/09/2016.....	108
Figura 69. Sobreposição do padrão de sombreamento do programa Sun Position à imagem georreferenciada do Google Earth®.....	108
Figura 70. Curva de variação de maré para o marégrafo de Torre Grande, no dia 28/09/2016.....	109
Figura 71. Traçado das linhas de costa não corrigida (à direita) e corrigida para 0 DHN (à esquerda).....	110
Figura 72. Sobreposição da linha de costa corrigida da imagem do Google Earth® ao MDE do levantamento de campo	110
Figura 73. Posições da linha de costa na região entre os Canais 5 e 6.	112
Figura 74. Posições da linha de costa na região entre o Canal 6 e a extremidade da praia.....	113
Figura 75. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 1 da Figura 73, resultando em um recuo total de 26,6 metros para o perfil STOS-18.	114
Figura 76. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 2 da Figura 73, resultando em um recuo total de 35,9 metros para a seção 4'.	115
Figura 77. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 3 da Figura 73, resultando em um recuo total de 47,44 metros para a seção 3'.	115

Figura 78. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 4 da Figura 74, resultando em um recuo total de 37,1 metros para a seção 2.	116
Figura 79. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 5 da Figura 74, resultando em um recuo total de 57,4 metros para a seção 0-1.	116
Figura 80. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-23.	118
Figura 81. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-22.	118
Figura 82. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-21.	119
Figura 83. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-19.	119
Figura 84. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-18.	119
Figura 85. MDE resultante da subtração dos MDE FUNDESPA (2014) <i>versus</i> UNICAMP (2016).	120
Figura 86. Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 2.	121
Figura 87. Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 3.	122
Figura 88. Diferença de cotas entre os Cenário 2 e Cenário 3.	122
Figura 89. Cenário 1 do <i>time step</i> 517 (meia maré enchente).	124
Figura 90. Cenário 2 do <i>time step</i> 517 (meia maré enchente).	124
Figura 91. Cenário 3 do <i>time step</i> 517 (meia maré enchente).	124
Figura 92. Cenário 1 do <i>time step</i> 552 (meia maré vazante).	125
Figura 93. Cenário 2 do <i>time step</i> 552 (meia maré vazante).	125
Figura 94. Cenário 3 do <i>time step</i> 552 (meia maré vazante).	125
Figura 95. Cenário 1 do <i>time step</i> 564 (1 hora antes da baixa-mar).	127
Figura 96. Cenário 2 do <i>time step</i> 564 (1 hora antes da baixa-mar).	127
Figura 97. Cenário 3 do <i>time step</i> 564 (1 hora antes da baixa-mar).	127
Figura 98. Cenário 1 do <i>time step</i> 85 (meia maré enchente).	129
Figura 99. Cenário 2 do <i>time step</i> 85 (meia maré enchente).	129
Figura 100. Cenário 3 do <i>time step</i> 85 (meia maré enchente).	129
Figura 101. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 1 e Cenário 2 para o <i>time step</i> 85 (meia maré enchente).	130
Figura 102. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 2 e Cenário 3 para o <i>time step</i> 85 (meia maré enchente).	130
Figura 103. Cenário 1 do <i>time step</i> 46 (meia maré vazante).	131
Figura 104. Cenário 2 do <i>time step</i> 46 (meia maré vazante).	131
Figura 105. Cenário 3 do <i>time step</i> 46 (meia maré vazante).	131

Figura 106. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 1 e Cenário 2 para o <i>time step</i> 46 (meia maré vazante).....	132
Figura 107. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 2 e Cenário 3 para o <i>time step</i> 46 (meia maré vazante).....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo das intervenções antrópicas na orla de Santos.	70
Tabela 2. Espaçamento horizontal adotado para o modelo Mike 21 no trabalho de Baptistelli (2008).	76
Tabela 3. Datas e área estudadas durante os levantamentos de campo.	85
Tabela 4. Data das imagens retiradas do Google Earth	94
Tabela 5. Coordenadas do recorte realizado no modelo original.	102
Tabela 6. Dados de onda e vento considerados nas simulações.	103
Tabela 7. Instantes de maré e <i>time steps</i> dos quais foram extraídas saídas de resultados.	106
Tabela 8. Datas, tipos de dados e incidência de ressacas para as linhas de costa a serem analisadas.	111
Tabela 9. Identificação das linhas de costa de acordo com sua respectiva data. ...	114
Tabela 10. Volume erodido para os dois trechos considerados.	120
Tabela 11. Calibração de ondas para condição com correntes.	128

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. OBJETIVOS.....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Efeitos de ondas em águas rasas e medição de ondas.....	23
3.2. Morfodinâmica de praias	31
3.3. Marés, estuário e embocaduras	38
3.4. Proteção costeira	43
3.4.1. Obras costeiras rígidas.....	44
3.4.1.1. <i>Obras longitudinais aderentes</i>	44
3.4.1.2. <i>Espigões costeiros</i>	47
3.4.1.3. <i>Quebra-mares destacados</i>	48
3.4.2. Obras costeiras leves	50
3.5. Modelagem numérica	54
4. ÁREA DE ESTUDO	58
5. MATERIAIS E MÉTODOS	82
5.1. Dados de campo	82
5.1.1. Levantamentos de campo	82
5.1.1.1. <i>Georreferenciamento e levantamento topográfico</i>	82
5.1.1.2. <i>Levantamento batimétrico</i>	89
5.1.2. Processamento dos dados de campo.....	91
5.1.2.1. <i>Dados topográficos</i>	91
5.1.2.2. <i>Dados batimétricos</i>	92
5.1.2.3. <i>Variação da linha de costa entre 2009 e 2017</i>	93
5.1.2.4. <i>Comparação de batimetrias e alteração do volume de controle</i>	95

5.2.	Modelagem Mike 21	97
5.2.1.	Módulo Flow Model FM – HD	98
5.2.2.	Módulo SW	103
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
6.1.	Dados de campo	107
6.1.1.	Variação da linha de costa entre 2009 e 2017	107
6.1.2.	Comparação de batimetria e alteração do volume de controle	118
6.2.	Modelagem Mike 21	123
6.2.1.	Módulo Flow Model FM – HD	123
6.2.2.	Módulo SW	128
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

1. INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um problema presente nos litorais ao redor do mundo, sendo tema de estudos há mais de sessenta anos – Per Bruun, por exemplo, tem estudos datados da década de 1950 (BRUUN, 1954). Segundo Bird (1996 apud ANTHONY, 2005), é estimado que mais de 70% das praias ao redor do globo estejam erodindo. O aumento das atividades humanas e da população costeira, bem como a realização de obras sem critérios ou planejamento, são fatores que contribuem para o aumento da erosão. Entretanto, as causas não são de origem apenas antrópica, há também alterações de caráter natural, como, por exemplo, mudanças no clima de ondas e nas taxas de transporte de sedimentos (VAN RIJN, 2011).

Ademais, o próprio ambiente sofre com a ação de vários agentes naturais de diferentes escalas temporais e espaciais, tais como ondas, marés, correntes, ventos e aporte fluvial. Esses fenômenos não atuam de forma isolada, o que enfatiza a grande complexidade e relevância da análise da combinação desses processos (ÂNGULO, 2004).

Conforme Muehe (2006), no Brasil, há uma relação direta entre maior concentração populacional e maiores impactos dos processos erosivos. Cerca de 80% das causas da erosão costeira estão associadas às ações humanas, principalmente interferências no balanço sedimentar por meio de construções muito próximas às praias, e estruturas rígidas para estabilização de embocaduras, voltadas para posterior construção de portos ou da proteção da linha de costa. Nesse contexto, os agentes naturais ficam em segundo plano, pelo menos em curto prazo.

O litoral paulista, por exemplo, apresenta vários pontos com progressiva erosão, como Ilha Comprida, Peruíbe, Massaguaçu (Caraguatatuba), Ponta da Praia (Santos), Guarujá, entres outros (SOUZA, 2009). Apesar disso, há poucos estudos envolvendo a área da engenharia costeira, já que, muitas vezes o problema tende a ser contemplado apenas no âmbito da oceanografia, geologia e biologia.

Segundo Komar (1998), as simulações em modelos matemáticos se mostram cada vez mais relevantes para avaliar os impactos da construção de estruturas costeiras na configuração da linha de costa, replicando ou prevendo os padrões de erosão ou progradação. Entretanto, para Mangor et al. (2017), independentemente da complexidade da ferramenta utilizada, os conhecimentos de engenharia costeira

não devem ser desprezados. Os modelos são apenas um auxílio ao profissional e devem ser utilizados de forma cuidadosa, já que, muitas vezes, podem não representar fielmente a realidade.

Neste contexto, encontra-se a região da Ponta da Praia que, segundo Italiani (2014), está sujeita a uma erosão acentuada devido à urbanização desordenada da orla e à construção do Porto de Santos. Além disso, é uma área de circulação hidrodinâmica complexa devido à combinação entre o sistema estuarino santista, a Baía de Santos e suas praias (TESSLER et. al, 2006).

É evidente a importância tanto das praias quanto do porto. A praia é visada como um espaço de lazer, esportes e diversão. E a retração costeira, por sua vez, não prejudica apenas os rendimentos do turismo, como interfere nas atividades humanas e em toda infraestrutura associada (RANGEL-BUITRAGO; GIORGIO; WILLIAMS, 2015). Por outro lado, o Porto de Santos, em 2016, respondeu por 28,5% da balança comercial brasileira, o que corresponde a 92,1 bilhões de dólares movimentados (CODESP, 2016). Participação que supera a soma da influência dos outros seis maiores portos brasileiros.

Entretanto, após as obras de alargamento e aprofundamento para ampliação do canal de acesso ao Porto, encerradas em 2010, houve intensificação do processo de recuo da praia (GIRELI et al., 2017). A região encontra-se, atualmente, em condições críticas de erosão, visto que a faixa de areia é praticamente inexistente. A prefeitura de Santos tem feito intervenções emergenciais no local, que consistem em alimentação artificial com areia retirada de dentro dos canais 2 e 3 e colocação de pedras junto aos muros de praia, como tentativa de proteger as estruturas urbanas existentes. Tais medidas são aplicadas sem estudos técnicos, sendo ineficientes na contenção dos efeitos causados pela erosão costeira.

Logo, soluções mais eficientes de curto e médio prazo são necessárias, visto que a comunidade, residente na região da Ponta da Praia, clama por medidas mais efetivas para conter o avanço do mar junto as suas residências e comércio local. Em contrapartida, inúmeros estudos realizados no local não apresentam de forma objetiva quais as causas destes processos erosivos nem, contudo apontam para soluções palatáveis. Além disso, apenas uma análise crítica dos eventos ocorridos, em tempos passados na área de estudo, será capaz de apontar as reais causas da erosão costeira. O que é fundamental para avaliação de uma solução definitiva mais

adequada, visando preservar a sinergia entre a população urbana, o desenvolvimento do Porto de Santos e a preservação do meio ambiente.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar, com base em dados remotos e levantamentos de campo do período entre 2009 e 2017, a progressão do processo erosivo na região da Ponta da Praia em Santos.

Tem ainda, os seguintes objetivos específicos:

- Fazer um histórico da região de estudo com relação à morfodinâmica da praia e intervenções antrópicas relevantes na contextualização do problema;
- Avaliar o emprego de modelos matemáticos hidrodinâmicos e de ondas espectrais em locais onde há efeitos da difração e reflexão, além de avaliar como a hidrodinâmica se altera em função das alterações topobatimétricas na região de estudo, tais como: mudanças de profundidade e alterações do perfil praias devido à dragagem, ressacas ou alterações climáticas sazonais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Efeitos de ondas em águas rasas e medição de ondas

As ondas geradas pelo vento são importantes agentes de transferência de energia. Elas, primeiramente, obtêm sua energia do vento, depois a transferem pela extensão do oceano, e, por fim, distribuem-na por toda a zona costeira. Nesta região, tal energia pode ser a causa primária da erosão, como também pode gerar uma variedade de correntes litorâneas e padrões de transporte sedimentar. As ondas são, normalmente, o parâmetro mais relevante e decisivo tanto para a morfologia como para obras de engenharia costeira (USACE, 1984; KOMAR, 1998).

Segundo Komar (1998), a geração das ondas é dependente da velocidade e duração do vento, bem como da extensão aérea da tempestade. As ondas encontradas dentro da área de geração são chamadas vagas e são altamente complexas, isto é, formam um espectro com diversas alturas e períodos. Já as ondulações ou marulhos (também conhecidas como *swell*) são mais regulares, com alturas e distâncias entre cristas mais uniformes, e são encontradas longe da zona de geração.

As ondas que atingem as regiões costeiras dissipam boa parte da sua energia na zona litorânea. Tal dissipação ocorre por meio dos chamados efeitos de ondas em águas rasas que, geralmente, são resumidos em cinco: refração, difração, reflexão, arrebentação e empolamento (USACE, 1984).

O fenômeno de refração é definido como a mudança de direção (ou curvatura) de uma frente de ondas em função da obliquidade entre estas e as isóbatas, isto é, linhas de mesma profundidade. Tal curvatura se dá devido à propagação da frente de ondas em diferentes profundidades e, por consequência, com diferentes celeridades. Sendo assim, as ondas tendem sempre a atingir a linha de costa perpendicularmente, embora nem sempre sofram refração suficiente a ponto de chegarem à praia com ângulo reto (OPEN UNIVERSITY, 1999). Na Figura 1, é apresentado um esquema da refração das ondas próximo da linha de costa e promontórios. Já na Figura 2, tem-se a situação real da refração de uma frente de ondas.

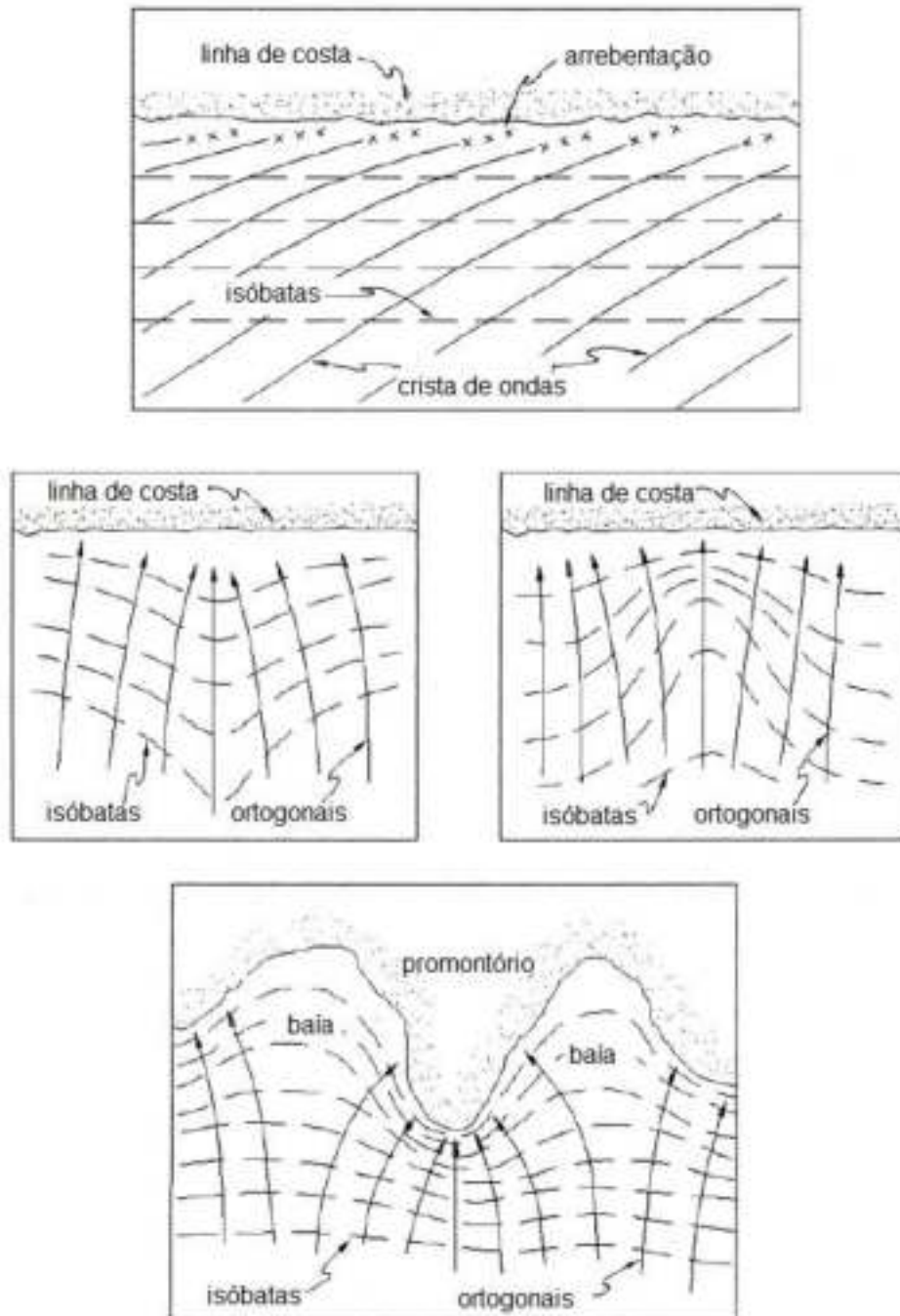


Figura 1. Refração das ondas.
 Fonte: adaptado de USACE, 1984.

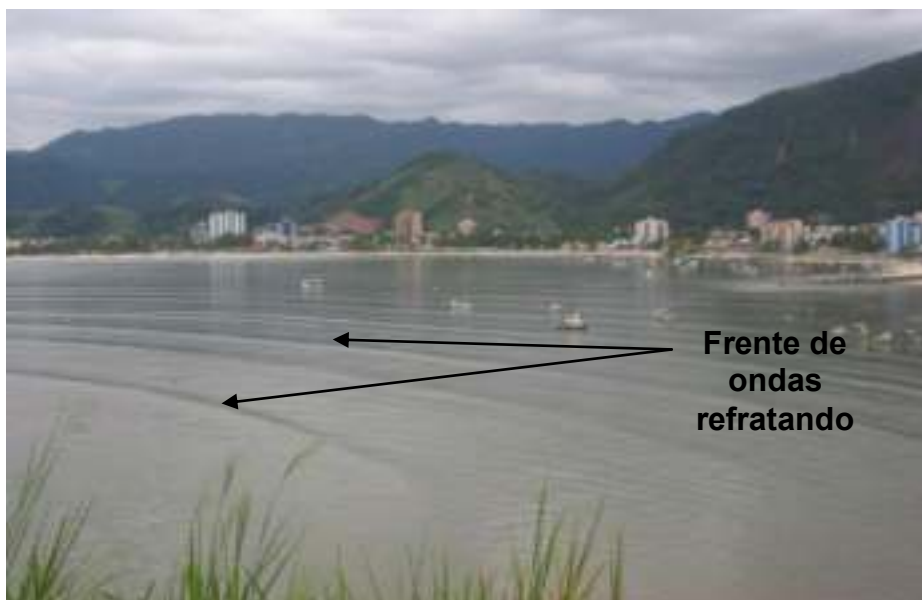


Figura 2. Refração de ondas na Praia do Centro em Caraguatatuba, São Paulo – Brasil.
Fonte: Telles; Gois; Garcia, 2012.

A difração, por sua vez, é o fenômeno de transferência de energia ao longo de uma frente de ondas quando da passagem por um obstáculo, como pequenas ilhas ou quebra-mares. Sendo assim, as ondas se propagam progressiva e radialmente na zona de sombra atrás desta barreira, com mesma fase e período da onda que incidiu. A altura da onda decresce na medida em que os arcos se afastam do ponto de difração (USACE, 1984). O fenômeno está ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Difração das ondas ao passarem pela obra de abrigo do Porto de Mucuripe em Fortaleza, Ceará - Brasil.
Fonte: adaptado de Google Earth, ©2015 Google Inc.

Segundo USACE (1984), a reflexão pode ser total ou parcial. A primeira ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação com a mesma altura e período da onda incidente, porém com diferentes direção e sentido, e com dissipação de energia quase nula. Enquanto que na reflexão parcial, há dissipação parcial de energia e a onda refletida não preserva as características da onda incidente. O fenômeno pode ser visto na Figura 4.



Figura 4. Reflexão de ondas devido à presença de obras de proteção costeira em Santos, São Paulo - Brasil.

Fonte: acervo pessoal, junho, 2016.

Já a arrebentação é definida como a instabilização da onda quando esta se propaga por águas rasas, isto é, o comprimento da onda diminui concomitantemente ao aumento da sua altura, o que causa uma redução de celeridade e aumento de velocidade orbital horizontal. Logo, a onda arrebenta devido à sua esbelteza elevada, e conforme a onda quebra, sua energia obtida do vento é dissipada, e parte dessa energia pode ser refletida de volta para o mar, fator que depende da declividade da praia. Quanto mais suave for o relevo, menor será a taxa de reflexão da onda (OPEN UNIVERSITY, 1999). Há quatro tipos possíveis de arrebentação, indicados na Figura 5: progressiva, mergulhante, colapsante ou ausência de arrebentação.

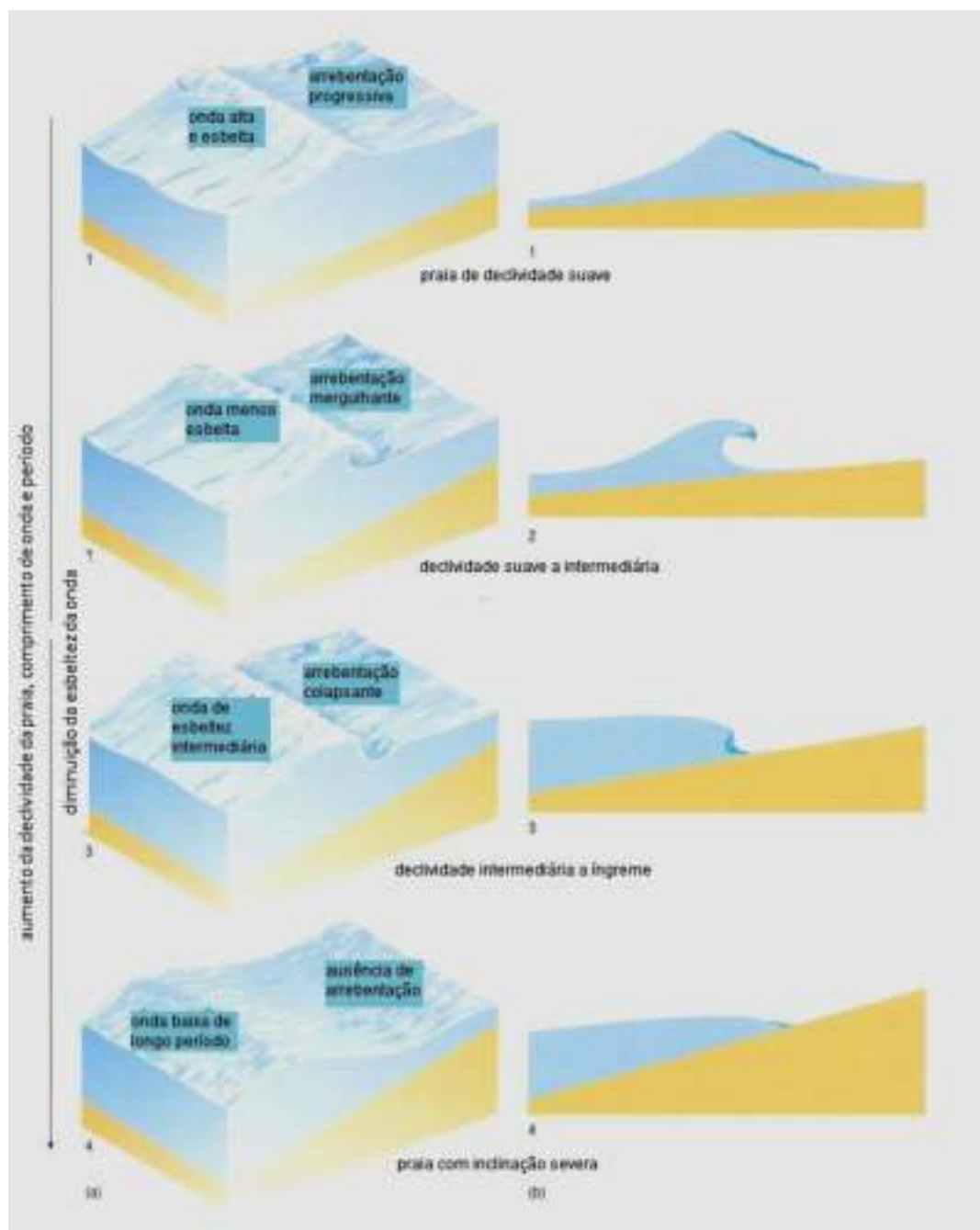


Figura 5. Quatro tipos de arrebentação: (a) vista em perspectiva e (b) seção transversal.
 Fonte: adaptado de Open University, 1999.

Por fim, o fenômeno de empolamento é a alteração da altura da onda devida apenas à redução da profundidade, sendo que, instantes antes da arrebentação, a onda atinge sua altura máxima (USACE, 1984). O evento dá-se na seguinte sequência: primeiro ocorre uma diminuição da altura da onda, causada pela dissipação de energia devido ao atrito com o fundo – o que depende da extensão da plataforma, isto é, quanto maior a plataforma, mais energia será dissipada e menor será a altura máxima; em seguida há um aumento da altura por causa da elevação

da densidade de energia dada a redução do comprimento da onda; e, então, ocorre a arrebentação. Um exemplo deste fenômeno é a formação das ondas gigantes nas praias do Havaí (Estados Unidos), local onde ocorrem mudanças bruscas de profundidade, Figura 6.



Figura 6. Onda gigante arrebentando em praia do Havaí.
Fonte: Clark Little, s.d.¹

Quando se trata da medição e análise das ondas, estas são tarefas de alta complexidade, de modo que a determinação de seu período ou sua altura não se resume à utilização de equipamentos simples e de baixa precisão. São necessários equipamentos sofisticados, capazes de resistir ao rigoroso ambiente marinho, além de um sistema que seja adequado para separar a grande mistura de informações de ondas provenientes das mais diversas zonas de geração (KOMAR, 1998).

Komar (1998) afirma que as diversas técnicas de medição de dados de onda (Figura 7) podem variar entre sensores *in situ*, tal como bóias ou ondógrafos, e sensoriamento remoto realizado por meio de altimetria por satélite – como, por exemplo, a missão TOPEX/Poseidon realizada pela parceria entre a agência espacial americana NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a agência espacial francesa CNES (*Centre National d'Études Spatiales*), no período de

¹ Disponível em: <<http://defendwildlife.com/home/clark-little-famous-wave-photographers-highly-experienced-surfer-and-photos/#>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

1992 a 2006, que teve como sucessora a missão *Jason-1* (TRABANCO, 2003; JET PROPULSION LABORATORY, 2017). Os equipamentos, por sua vez, dividem-se em duas categorias no que concerne às informações coletadas: aqueles que medem alturas e períodos, porém não os rumos; e aqueles que fazem a caracterização completa das ondas (KOMAR, 1998).

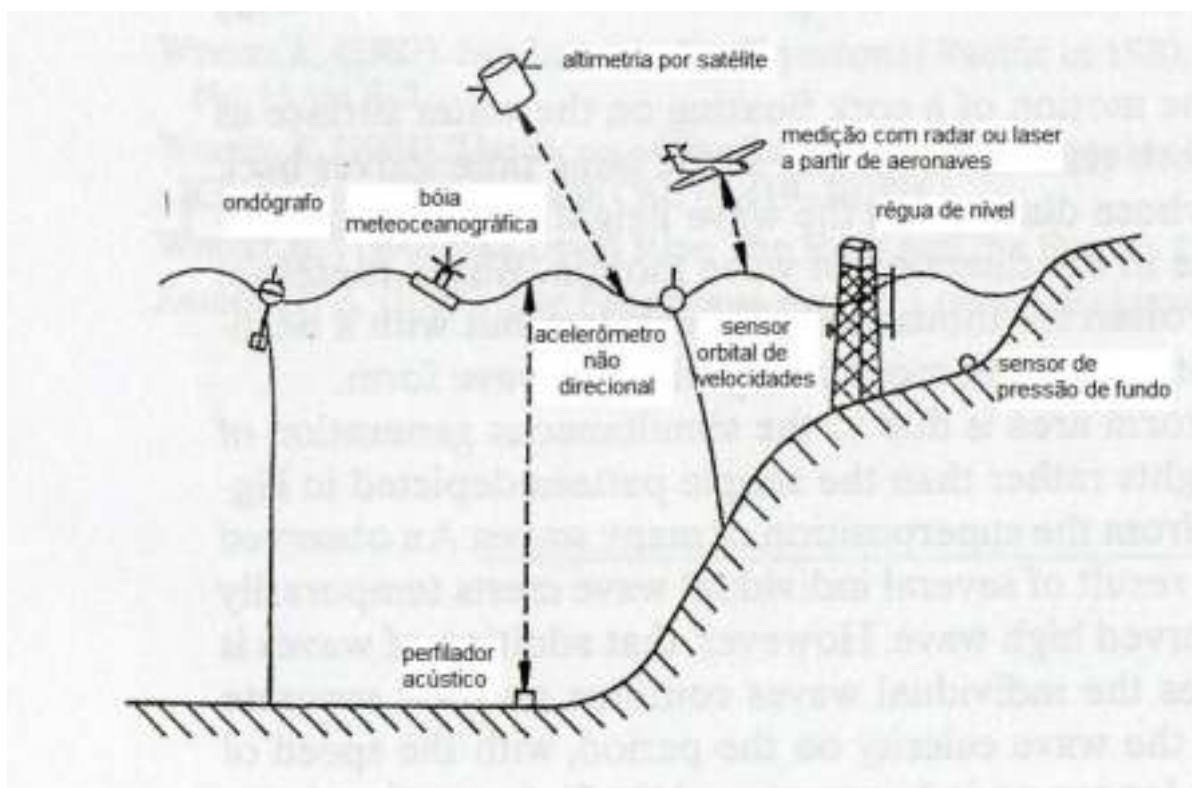


Figura 7. Diversos métodos para medição de dados de onda.
Fonte: adaptado de Komar, 1998.

Tendo em mente a importância da série temporal de informações, uma grande quantidade de países estabeleceu projetos para coleta sistemática de dados de onda ao longo de suas costas, tais como Japão, Inglaterra, Canadá, Egito e Estados Unidos (KOMAR, 1998). O Brasil, por sua vez, possui alguns programas de monitoramento de ondas por meio de boias e ondógrafos, como o Programa Nacional de Boias (PNBOIA), atualmente em funcionamento e sendo mantido pelo Centro de Hidrografia da Marinha (Figura 8); e o Rede Ondas que está em fase de implantação, iniciativa da Universidade Federal do Rio Grande, sendo supervisionada pelo programa GOOS/Brasil (*Global Ocean Observing System*) Entretanto, a maioria desses dados é medida em plataforma (mar aberto), existindo poucas informações coletadas em águas rasas (GOOS-BRASIL, 2017).



Figura 8. Boia Santos do programa PNBOIA.
Fonte: GOOS-Brasil.²

Para regiões do litoral de São Paulo, tem-se algumas compilações de dados como, por exemplo, SONDOTÉCNICA (1977), Garcia et al. (2002) e FUNDESPA (2013c), porém a atualização de informações não tem sido feita de forma periódica, resultando em escassez desse tipo de dados, como apontam Garcia et al. (2002). No que diz respeito aos programas nacionais citados anteriormente, para a região de Santos, há informações de três boias do programa PNBOIA com dados de março de 2011 a dezembro de 2017. Já com relação à Rede Ondas, atualmente existem poucas informações abertas ao público geral, pois o programa ainda está em fase de teste na região.

Em vista da precariedade de informações recentes, uma alternativa para obtenção de dados de onda tem sido os modelos globais como, por exemplo, o *WAVEWATCH III* desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), do departamento de comércio dos Estados Unidos (NOAA, 2017)

² Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/static/pdf/pnboia/SANTOS.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

Apesar de tais modelos suprirem a necessidade de informações em regiões com escassez de dados atuais, pode ocorrer perda de precisão nas proximidades da linha de costa, uma vez que está presente, por padrão, somente o módulo de atrito de fundo (TOLMAN, 2002). Desta forma, dados extraídos do modelo devem ser utilizados preferencialmente em conjunção com dados locais obtidos por meio dos métodos supramencionados, ou devem ser adotados modelos específicos para a simulação da propagação de ondas em zonas costeiras e internas, como o SWAN, desenvolvido pela *Delft University of Technology* (DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2017).

3.2. Morfodinâmica de praias

Segundo King (1972), praia é definida como um ambiente sedimentar costeiro de múltiplas composições, porém, geralmente constituído de areia e sujeito à incidência das ondas, estas abordadas no item 3.1. A determinação dos limites interno (no sentido do continente) e externo (no sentido do mar) se dão, respectivamente, pelo limite superior da ação de ondas de tempestade sobre a região costeira e pela profundidade a partir da qual os sedimentos se movimentam efetivamente sobre o fundo.

A morfodinâmica das praias aborda a dinâmica gerada pela atuação de ondas e correntes e a interação com sua morfologia (SHORT, 1979), de terminologia apresentada na Figura 9. Assim sendo, alterações morfológicas causam mudanças na hidrodinâmica presente e vice-versa, isto é, mudanças no padrão ondulatório e de correntometria, por exemplo, podem causar remodelações no perfil de praia. E tais remodelações, por sua vez, causam impacto na forma de atuação das ondas e correntes (WRIGHT & SHORT, 1983).

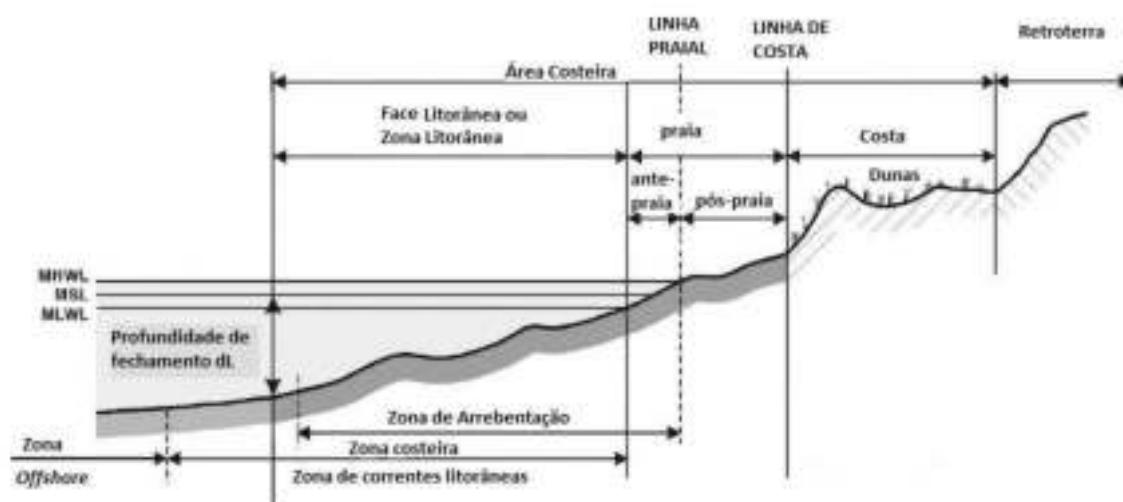


Figura 9. Definição dos termos do sistema praiado. MHWL: média das preamares; MSL: nível médio do mar; MLWL: média das baixa-mares.

Fonte: adaptado de Mangor et al., 2017 com termos retirados de USACE, 1984.

Segundo os estudos de Wright & Short (1983) realizados nas praias da Austrália, puderam ser identificados seis diferentes estágios praiados que são associados a diversos regimes de ondas e marés. Esses estágios podem ser separados em dois estados considerados extremos, dissipativo e refletivo, e quatro estados intermediários, como exposto na Figura 10.

Para o estado dissipativo (Figura 10, item a), a praia apresenta baixa declividade e uma longa extensão de areia, além de possuir grande reserva de sedimentos em sua parte subaquosa. Em contrapartida, o estado refletivo (Figura 10, item f) é definido por uma topografia íngreme, fundo marinho próximo e praias estreitas, com seu estoque de areia depositado, principalmente, na porção subaérea. Para os quatro estados intermediários, tem-se a coexistência de elementos de ambos os estados extremos (WRIGHT & SHORT, 1983).

Uma praia pode ter seu perfil transversal extensivamente alterado no que diz respeito a seu estado mais frequente, a depender das características do clima de ondas, da maré, do vento, da granulometria e suprimento dos sedimentos, da fisiografia da planície costeira e por fim, da plataforma continental adjacente (Souza et al., 2005). A classificação morfodinâmica das praias é pautada, portanto, no estágio mais recorrente e no grau de oscilação relativo a este estágio.

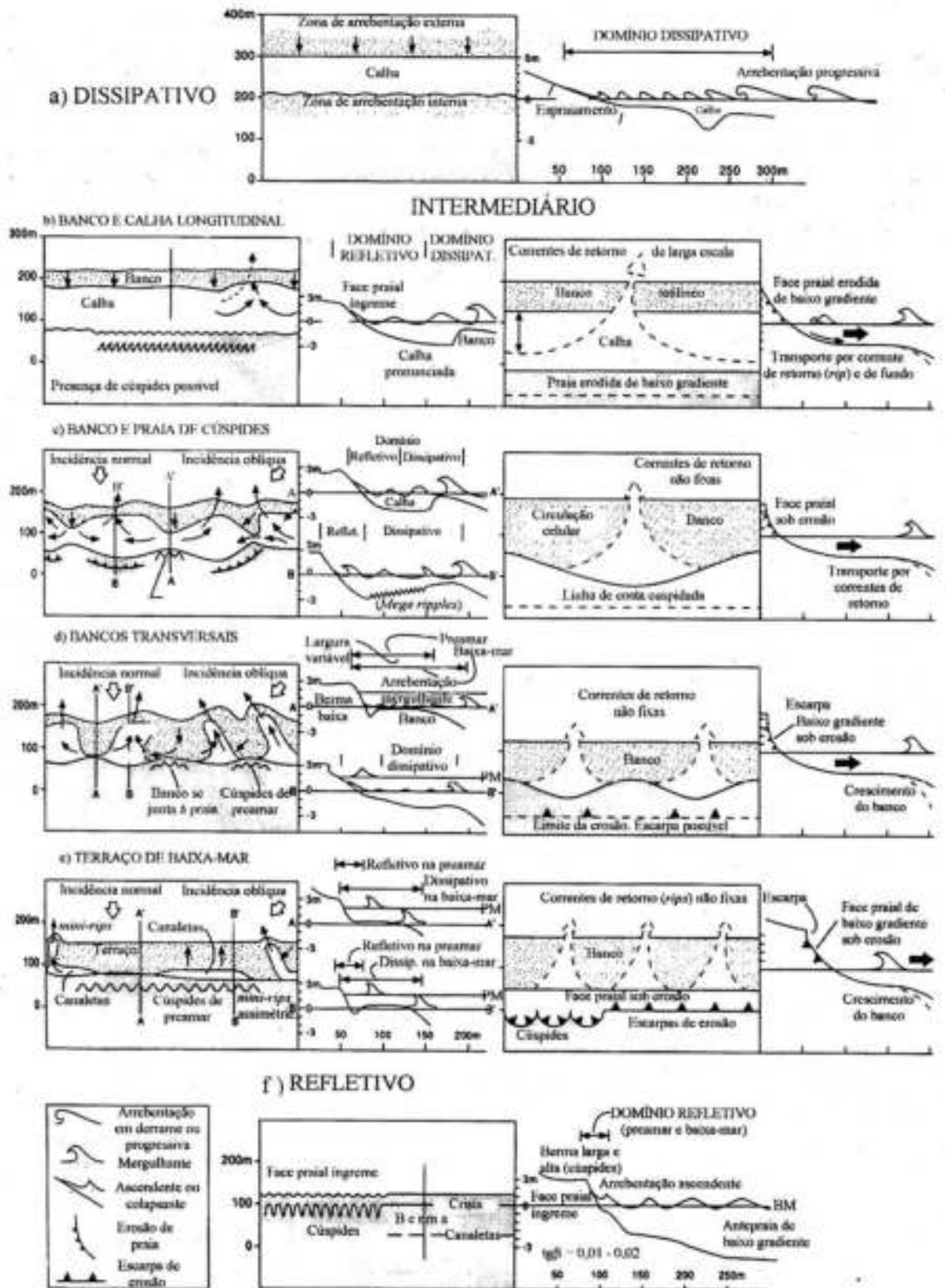


Figura 10. Estágios praias para o caso de ondas construtivas (à esquerda) e erosivas (à direita).
Fonte: Calliari et. al, 2003.

Para uma melhor compreensão da morfologia das praias, é necessário entender sua dinâmica sedimentar que envolve os processos de transporte litorâneo de sedimentos, estes podendo ser longitudinal ou transversal, assim como compreender o conceito de erosão costeira.

Segundo USACE (1984), o transporte longitudinal de sedimentos se processa paralelamente à linha de costa, sendo consequência do ataque oblíquo das ondas e da ação de correntes longitudinais por aquelas geradas. O movimento apresenta um sentido predominante, dependente da resultante da direção das ondas incidentes, e é responsável por carrear materiais longitudinalmente. Devido à variação do ângulo de incidência das ondas, o transporte longitudinal pode ser dividido em dois tipos: transporte global, isto é, o volume total de sedimentos movimentado, independente do sentido; e transporte resultante, que é o volume de sedimentos carreado no sentido preferencial da frente de ondas.

O transporte transversal, por sua vez, se dá na direção mar-costa, ou seja, perpendicularmente à linha costeira e em ambos os sentidos. Tal processo é responsável por alterar e modelar o perfil praiar em resposta ao ataque frontal das ondas ou ao aumento do nível do mar (USACE, 1984). Um esquema do transporte de sedimentos costeiro pode ser visto na Figura 11.

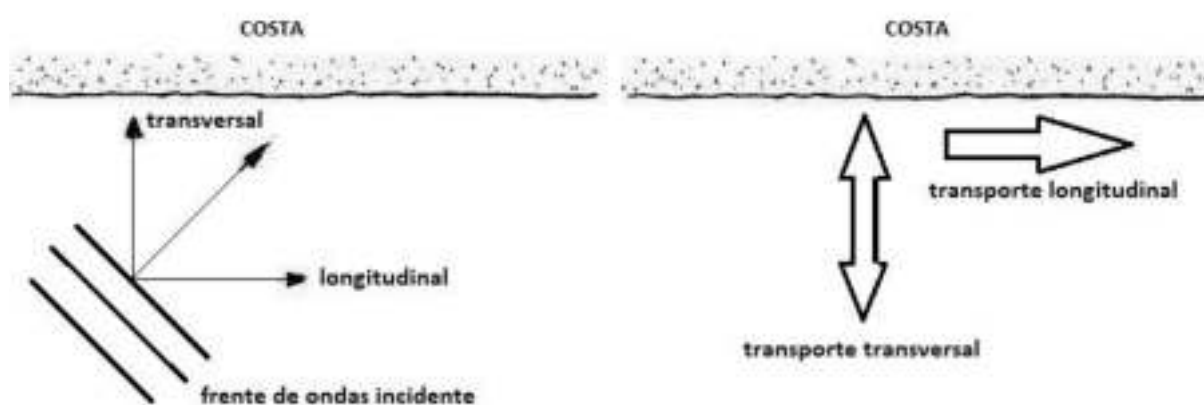


Figura 11. Esquema dos tipos de transporte de sedimentos litorâneo.
Fonte: elaborado pela autora.

Dependendo do balanço sedimentar da praia, isto é, o balanço volumétrico entre a quantidade de sedimentos supridos e disponíveis e a quantidade de sedimentos retirados pelo transporte (seja ele longitudinal ou transversal), as praias podem sofrer erosão, engorda ou permanecerem estáveis. Sendo assim, processos

erosivos na linha de costa que causam o desequilíbrio desse balanço podem ter diversas causas, como por exemplo: a retenção de sedimentos por obras de engenharia (Figura 12); a exaustão de fontes supridoras; e a readaptação do perfil de equilíbrio a uma elevação do nível do mar ou a uma modificação do clima de ondas (MUEHE, 2004).

Entretanto, as causas e os agentes responsáveis pela interferência no transporte litorâneo e, conseqüentemente, no suprimento de sedimentos, não são únicas e podem ser de origem natural, antrópica ou a combinação de ambas, pois os fatores estão sempre interagindo entre si, acarretando ou não na intensificação do processo erosivo. (Souza et al., 2005).

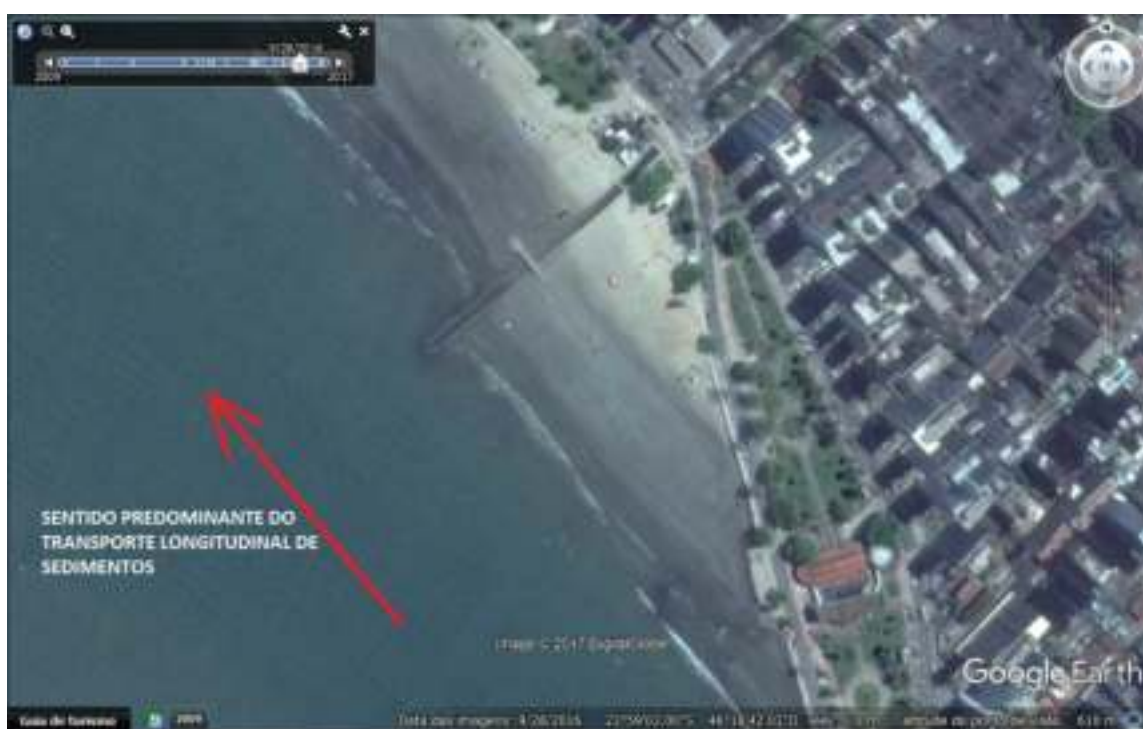


Figura 12. Exemplo de interferência no transporte longitudinal de sedimentos por obras de engenharia: canal de drenagem pluvial 6, Santos - SP.

Fonte: adaptado de Google Earth, ©2015 Google Inc.

Portanto, segundo Souza et al. (2005), a erosão costeira é um processo natural proveniente de um balanço sedimentar negativo, resultando na diminuição de largura de praia, extinção e desequilíbrio de habitats naturais, aumento da incidência de ressacas, destruição de estruturas construídas pelo homem e perda de atrativos turísticos.

É importante, porém, fazer uma distinção entre erosão aguda e erosão crônica. Segundo Mangor et al. (2017), a primeira costuma ser resultado de eventos

extremos, como ressacas e ondas com alturas superiores às predominantemente incidentes, que alteram todo o perfil praial, removendo grandes quantidades de areia para a zona *offshore*. Já a segunda se dá devido ao déficit no suprimento de sedimentos em determinada célula costeira. A erosão crônica normalmente se desenvolve de forma progressiva e constante ao longo dos anos, portanto não está relacionada apenas a eventos extremos.

A erosão aguda é uma situação reversível na maior parte das vezes, pois se trata de um estado temporário, já que o perfil de praia pode se recuperar total ou parcialmente após a tempestade. Nessa categoria, podem-se incluir, também, as variações sazonais da linha costeira (MANGOR et al., 2017). Assim sendo, segundo Wright & Short (1983), é importante entender tanto os mecanismos e as condições ambientais que propiciam mudanças de curto prazo, favorecendo diferentes amplitudes de mobilidade praial, quanto as causas da retração crônica das praias, no que concerne à proteção costeira.

No que diz respeito à morfologia dos perfis transversais de praia, sua alteração ocorre ao longo das estações do ano, devido à variabilidade climática e hidrodinâmica da região, até que atinjam um perfil de equilíbrio (que pode ser de “bom tempo”/verão ou de “mau tempo”/inverno), como visto na Figura 13. As alterações morfológicas do perfil transversal se dão na zona onde ocorre o transporte significativo de sedimentos, ou seja, na zona ativa de movimentação sedimentar. Assim, um perfil inicial de praia é continuamente alterado por uma dada condição de clima de ondas, até atingir uma nova configuração, na qual não há mais modificações em sua forma. Este perfil resultante é definido como o de equilíbrio. (KOMAR, 1998; OPEN UNIVERSITY, 1999).

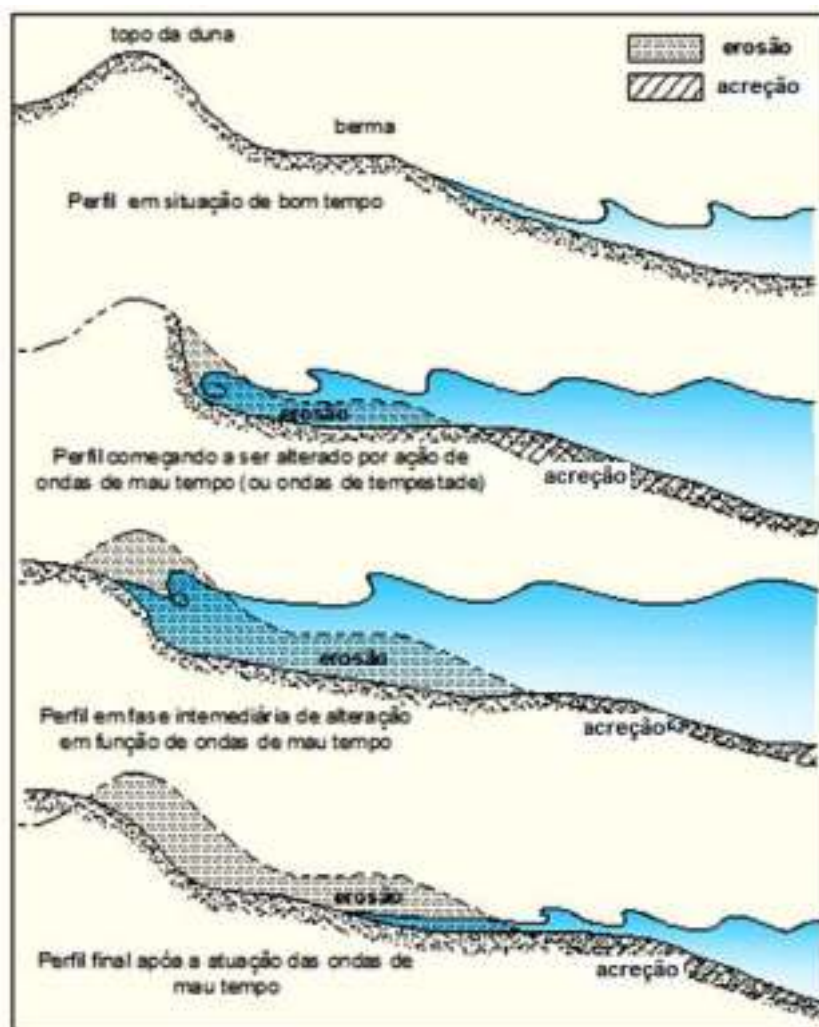


Figura 13. Alterações do perfil transversal da praia ao longo do ano.
Fonte: Telles; Gois; Garcia, 2012.

Segundo Schwartz (1967) e Bruun (1988), o equilíbrio das praias é, normalmente, um equilíbrio dinâmico: quantidades consideráveis de areia estão frequentemente em movimento. Entretanto, os fluxos de entrada e de saída de sedimentos em uma determinada área costumam compensar um ao outro. Enquanto a posição instantânea da linha da costa sofre alterações em curto prazo, a posição da linha média da costa pode ficar estável por um período que varia de meses a anos.

Uma parcela majoritária do transporte litorâneo de sedimentos ocorre em uma região limitada pela profundidade de fechamento, ilustrada na Figura 14. Esta é definida por Kraus et al. (1999) como a profundidade a partir da qual não são notadas trocas significativas de sedimentos entre o setor litorâneo e o segmento *offshore*, ou mudanças importantes na batimetria existente. A profundidade de fechamento separa a zona de transporte ativo sedimentar da região mais profunda,

na qual a taxa de erosão e sedimentação é consideravelmente baixa. Segundo Muehe (2004), tal ponto é responsável, também, pela determinação do “limite oceânico” da praia.

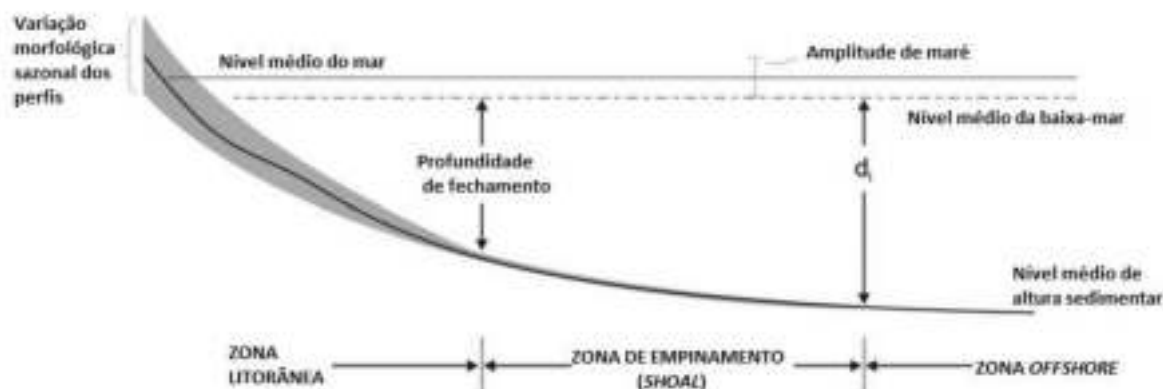


Figura 14. Perfil praiado com variação morfológica e ilustração da profundidade de fechamento, considerando praias arenosas.
Fonte: adaptado de Hallermeier, 1981.

A área estabelecida pela profundidade de fechamento pode ser definida de duas maneiras. A primeira se dá por meio de levantamentos de campo dos perfis praiados em seqüências temporais, no intuito de identificar os padrões típicos de comportamento e as amplitudes das mudanças ocorridas ao longo da escala temporal escolhida (e.g. BIRKEMEIER, 1985; LARSON; KRAUS, 1994). A segunda, por formulações empíricas, desenvolvidas por meio de dados coletados em campo, adotando condições de ondas extremas (e.g. HALLERMEIER, 1978, 1981) ou a média anual das alturas significativas de onda (HOUSTON, 1995). Atualmente, já é bem estabelecido que a profundidade de fechamento se torna maior conforme o período de observação aumenta (HINTON; NICHOLLS, 1998; NICHOLLS et al., 1998; SABATIER et al., 2004; CAPOBIANCO et al., 1997).

3.3. Marés, estuário e embocaduras

A maré astronômica oceânica é o fenômeno responsável pelo deslocamento das massas de água do oceano. Esta movimentação é causada pela influência gravitacional de corpos celestes como a Lua (70%) e, em menor intensidade, o Sol (30%). Ou seja, as marés são geradas a partir da atuação das forças gravitacionais e das forças centrífugas do sistema Terra-Lua-Sol, como ilustrado na Figura 15, que

resulta na subida e descida do nível do mar. A maré astronômica, portanto, possui um comportamento periódico e, então, previsível (USACE, 1984; OPEN UNIVERSITY, 1999).

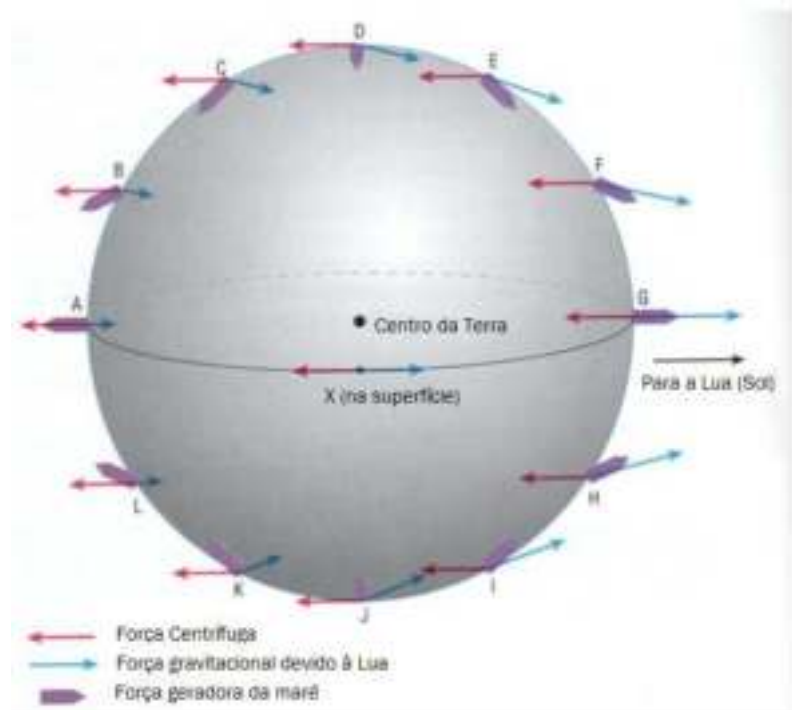


Figura 15. Derivação das forças geradoras da maré.
 Fonte: Coelho (2016) adaptado de Open University, 1999.

As posições relativas do Sol e da Lua influenciam diretamente na variação das marés. Quando o Sol e a Lua estão em conjunção (Lua Nova) ou oposição (Lua Cheia), as maiores amplitudes de maré são produzidas, com as maiores preamares e menores baixa-mares, ambas as situações são chamadas de Sizígia. Quando as forças geradoras das marés do Sol e da Lua estão em ângulo reto uma em relação à outra, isto é, a Lua está em quadratura (quarto crescente ou minguante), as marés lunar e solar estão defasadas e as amplitudes de maré são as menores. Estas situações são conhecidas como Quadratura (OPEN UNIVERSITY, 1999). Um esquema representando os fenômenos de sizígia e quadratura é apresentado na Figura 16.

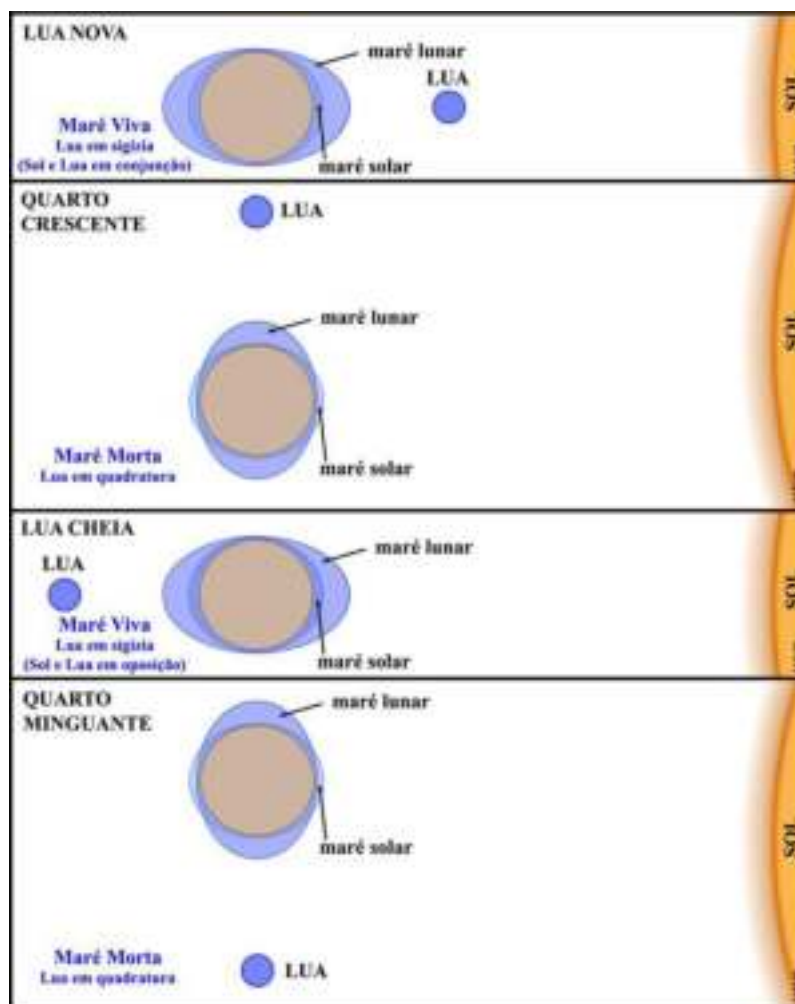


Figura 16. Marés de Sizígia e Quadratura.
Fonte: Cardoso, 2007.

A maré meteorológica (ou *surge*, em inglês), por sua vez, é um fenômeno proveniente de processos atmosféricos, como a incidência de ventos e alteração da pressão do ar. A combinação, por exemplo, da baixa pressão atmosférica e ventos, pode resultar em níveis elevados de maré (maré meteorológica positiva), causando possíveis inundações em regiões costeiras mais baixas. Enquanto o efeito oposto, isto é, combinação de alta pressão e ventos, resulta na maré meteorológica negativa e redução do nível d'água, o que causa impactos em regiões onde há navegação (OPEN UNIVERSITY, 1999).

Tendo definido os dois fenômenos anteriores, é importante ressaltar um terceiro, as chamadas ondas de tempestade (ou *storm surges*, em inglês), que se referem a eventos extremos de maré meteorológica positiva, seguidos de tempestade. Tal combinação resulta em uma maior sobrelevação do nível médio do mar, bem como ondas de alta potência e energia. No Brasil, tem sido utilizado o

termo não formal “ressaca” como sinônimo destes eventos (FUNDESPA, 2013b). A incidência de ressacas na região litorânea, portanto, pode acarretar em inundações, destruição de estruturas urbanas e erosão das praias.

Não obstante, a oscilação cíclica das marés, isto é, o deslocamento das grandes ondas oceânicas de longo período (duração de algumas horas) gera correntes de maré, que podem ser do tipo enchente ou vazante. A primeira ocorre quando há elevação do nível d’água, enquanto a segunda se refere ao abaixamento do nível. Ao registrar de forma contínua a variação lenta do nível do mar, obtém-se uma curva sensivelmente senoidal que se repete no tempo com períodos a alturas bem definidos. Na Figura 17 são apresentados os parâmetros característicos das variações de maré.

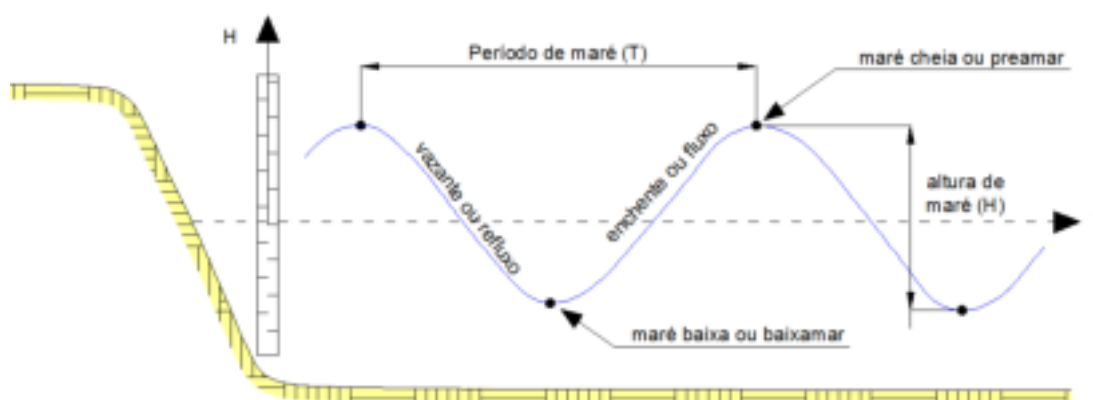


Figura 17. Parâmetros característicos das variações de maré.
Fonte: elaborado pela autora.

Por outro lado, o sistema estuarino é definido como um corpo de água semifechado no qual há mistura de processos fluviais e marinhos. Sua formação se dá por inundação de vales fluviais, causada pelo aumento do nível relativo do mar, devido às correntes de maré. O seu limite, indo em direção ao continente, é determinado pela zona onde as correntes de maré têm maior influência (FLORENZANO, 2008). Ademais, pode-se definir, também, o conceito de embocadura, que se refere a uma formação estreita (ou gargantas) localizada entre o oceano e um estuário (VAN DER WEGEN; DASTGHEIB; ROELVINK, 2010). Bruun (1978), no entanto, distingue três grupos principais de embocaduras:

- (i) Embocaduras de origem geológica;

- (ii) Embocaduras de origem hidrológica;
- (iii) Embocaduras provenientes da deriva litorânea.

Na Figura 18, tem-se o exemplo do complexo lagunar-estuarino de Cananéia em São Paulo e a localização da sua embocadura que é de origem geológica.



Figura 18. Trecho final do complexo lagunar-estuarino de Cananéia, São Paulo – Brasil e localização da sua embocadura.

Fonte: Guapuruvu Meio Ambiente e Preservação, 2014.³

Um conceito importante retomado por Correa, Souza e Gireli (2016) em seus estudos, é o de prisma de maré, que está diretamente ligado às embocaduras. Ele é definido como o volume de água resultante, dentro de um estuário, compreendido entre uma maré de enchente e uma maré de vazante.

Sendo assim, os efeitos das correntes de maré em um estuário promovem uma dinâmica que afeta a salinidade, o transporte de sedimentos, e podem retardar os tempos de enchente e acelerar os períodos de vazante, devido à influência da vazão fluvial contra ou a favor do fluxo, respectivamente (USACE, 1984; FLORENZANO, 2008).

³ Disponível em: <<http://guapuruvu.eco.br/tag/cananeia/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

Como os rios são as principais fontes de sedimentos das praias, tais materiais são transportados para a região estuarina e, em seguida, para a zona costeira. Devido à combinação do fluxo de sedimentos com as correntes de maré, há duas formações típicas: delta de maré enchente e delta de maré vazante. A primeira é definida como um alto fundo arenoso, formado pela captura do transporte sedimentar litorâneo pelas correntes de enchente. Já a segunda é definida como um alto fundo de barras compostas de areia, que se formam pelo processo de captura do transporte litorâneo de sedimentos, devido ao efeito de “molhe hidráulico” e difusão das correntes exercida pela descarga da embocadura (KJERFVE, 1989).

Por fim, é importante ressaltar que essa movimentação das correntes de maré pode causar impactos nas praias adjacentes às embocaduras, como, por exemplo, interferindo no transporte sedimentar ou alterando a intensidade das correntes. Tais mudanças na hidrodinâmica podem resultar na intensificação de processos erosivos.

3.4. Proteção costeira

O crescimento populacional nas regiões costeiras ao redor do mundo aumentou a demanda pelo uso recreativo das praias. Somado a isso, houve uma intensificação de processos erosivos devido à construção de casas, hotéis, estradas e estacionamentos localizados, geralmente, no trecho de recuo da linha de costa e sujeitos aos impactos destrutivos das tempestades. Visando minimizar tais consequências foram desenvolvidos métodos de proteção costeira (KOMAR, 1998).

Segundo Mangor et al. (2017), para que a proteção costeira seja sustentável, ela deve combinar a necessidade de proteção das infraestruturas urbanas com a preservação das paisagens naturais. Assim sendo, ela deve ser projetada de forma eficiente e otimizada, considerando longos períodos de retorno.

Neste item serão abordadas duas categorias de obras costeiras: rígidas e leves. Serão detalhadas aquelas existentes ou passíveis de aplicação na área de estudo, isto é, obras que por meio de análise de modelagens física ou numérica se mostrem alternativas interessantes para o controle de processos erosivos na região de interesse.

3.4.1. Obras costeiras rígidas

Obras costeiras rígidas são estruturas que visam fortificar a linha de costa, projetadas para resistir ao ataque das ondas e fixar ou aumentar a linha praial. Podem ser citadas: obras longitudinais aderentes; espigões costeiros que atuam como pequenos molhes, isto é, aprisionam os sedimentos provenientes da deriva litorânea, de forma a manter certa extensão de praia; e quebra-mares destacados que abrigam a orla dos ataques das ondas de forma pontual (KOMAR, 1998). Entretanto, segundo Van Rijn (2011), em condições de maré elevada, os quebra-mares e espigões não são soluções para a erosão induzida por condições climáticas extremas, no que diz respeito a dunas e falésias menos resistentes aos processos abrasivos.

As estruturas rígidas destinam-se, em geral, à proteção da linha de costa contra a retração, preservando, assim, edificações, infraestruturas e a retroterra dos processos erosivos. Todavia, tais medidas resultam em perda de praia e paisagem costeira (MANGOR et al., 2017). A seguir, algumas dessas obras serão definidas e detalhadas, sendo apresentadas suas vantagens e desvantagens, bem como os impactos que causam ao longo da linha de costa.

3.4.1.1. Obras longitudinais aderentes

As obras longitudinais aderentes são estruturas implantadas paralelamente à linha de costa, podendo ser formadas por muros e/ou revestimentos. Segundo Komar (1998), os muros são construções massivas projetadas para resistir à força total das ondas e ressacas. Tais estruturas, geralmente inclinadas e compostas de concreto, são responsáveis por separar água e terra. Elas podem ser do tipo lisa, com degraus ou encurvada, conforme expõe a Figura 19. Além disso, os muros podem ser constituídos de enrocamento, por armadura de aço ou madeira (MANGOR et al., 2017).

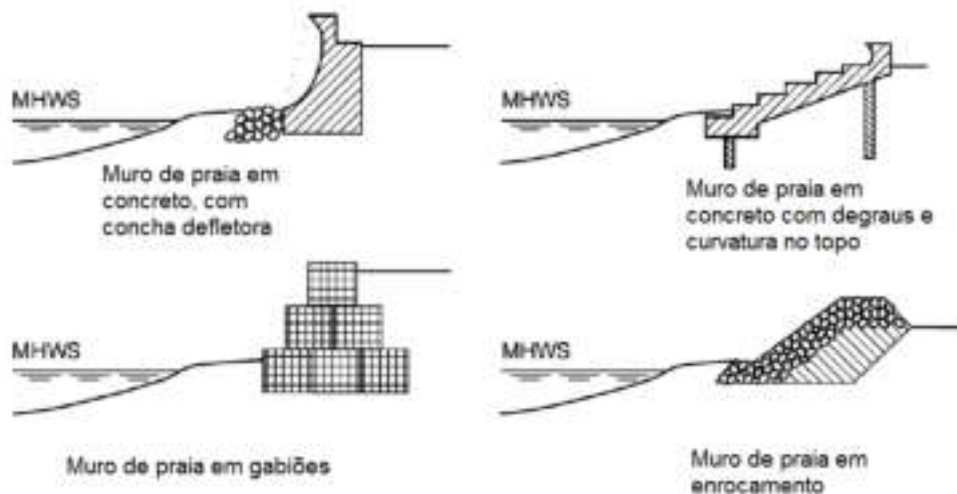


Figura 19. Exemplos de muros de praia utilizando a preamar média de sizígia (MHWS) como referência.

Fonte: adaptado de Mangor et al., 2017.

A face côncava ou vertical dessas estruturas é responsável por refletir a energia das ondas para cima e de volta para o mar. Porém, por mais que essa reflexão ajude a manter os patrimônios costeiros, ela pode causar uma erosão intensa e mais acentuada na praia (KOMAR, 1998). O muro de praia exemplificado pela Figura 20, portanto, protege apenas o que está no tardoz da obra.



Figura 20. Muro de praia em pedra argamassada combinado com enrocamentos, Santos, São Paulo - Brasil.

Fonte: acervo pessoal, junho, 2016.

Os revestimentos, por sua vez, são compostos por faces inclinadas de enrocamentos, por blocos de concreto, também chamados dolos, ou por colchões de gabião, entre outros. Geralmente, são construídos aos pés de falésias, dunas, diques ou muros de praia, como ilustra a Figura 21. Apesar da definição muito semelhante aos paredões, os revestimentos não protegem as estruturas contra inundações e podem ser utilizados como complemento a outras construções (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017).

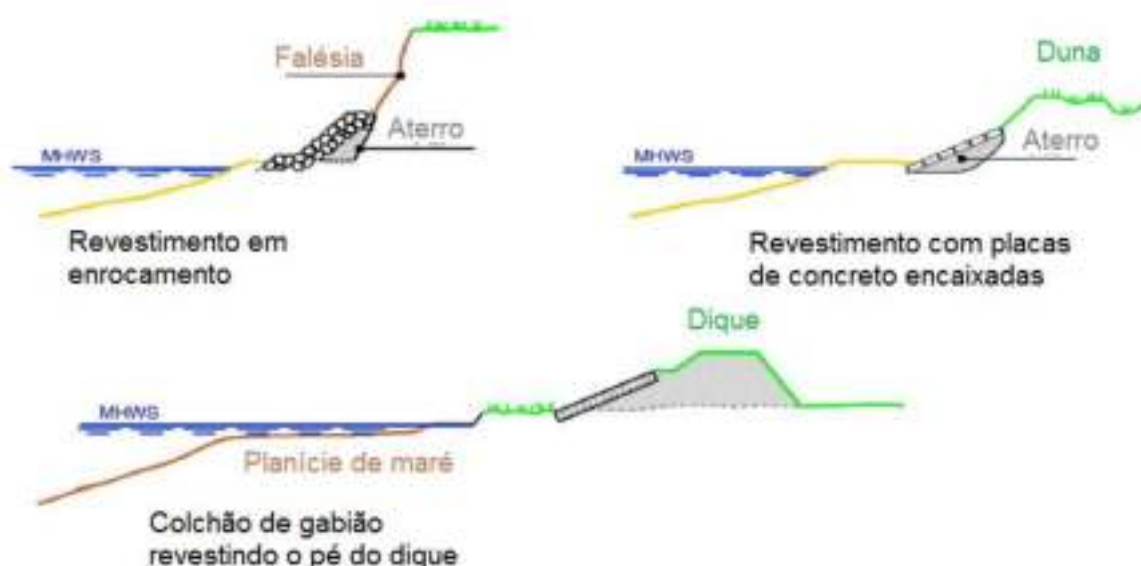


Figura 21. Exemplos de revestimentos utilizando a preamar média de sizígia (MHWS) como referência.

Fonte: adaptado de Mangor et al., 2017.

As vantagens dos revestimentos em contraposição aos muros são: normalmente apresentam menor custo; dissipam mais energia, logo causam menos erosão na praia devido à incidência e reflexão das ondas; sua alta rugosidade faz com que apresentem menor índice de galgamentos causados por *run-up* de ondas; e são de fácil manutenção, bastando acrescentar novas pedras (KOMAR, 1998). Ademais, os revestimentos são estruturas menos rígidas que os muros de praia e mais fáceis de modificar, visando à adaptação a futuras mudanças do nível do mar (MANGOR et al., 2017). Na Figura 22, pode-se ver um exemplo de revestimento de enrocamento em complementação ao muro de praia, localizado na região da Ponta da Praia, em Santos – São Paulo.



Figura 22. Revestimento em enrocamento para complementar o muro de praia em pedra argamassada, Santos, São Paulo – Brasil.
Fonte: acervo pessoal, junho, 2016.

3.4.1.2. Espigões costeiros

Um espigão é uma estrutura esbelta, construída, em geral, perpendicularmente à orla, sendo projetada para aprisionar sedimentos provenientes do transporte longitudinal. Essa faixa de areia gerada atua como uma região de amortecimento entre a zona litorânea e a costa, logo, os espigões são capazes de diminuir a erosão a que as propriedades costeiras estão submetidas. Normalmente, essas obras são estreitas em largura, porém podem ter comprimentos que variam de 10 a mais de 200 metros (KOMAR, 1998).

Os espigões podem ter formato especial e ser do tipo emerso ou submerso; podem ser construídos de forma individual (Figura 23) ou como campo de espigões. Em geral, sua estrutura é composta por enrocamentos, mas permitem também a utilização de outros materiais, como madeiras, blocos de concreto ou *geobags* preenchidos com areia ou concreto (MANGOR et al., 2017).

Segundo Komar (1998), em contrapartida à sua função, os espigões podem mudar o foco dos processos erosivos de um ponto a outro. Isso se deve ao fato de eles interferirem no transporte sedimentar longitudinal: ao resolver um problema de erosão local, este pode migrar para a praia imediatamente adjacente que sofre pela escassez de sedimentos. Para prevenir este dano, o recomendado é que a área

entre espigões seja artificialmente alimentada, de modo que seu preenchimento não derive do transporte costeiro de areia e as praias vizinhas continuem a ser supridas com a mesma taxa de transporte de antes das obras.



Figura 23. Espigões costeiros em Fortaleza, Ceará – Brasil.
Fonte: ME/Portal da Copa, 2012.⁴

3.4.1.3. Quebra-mares destacados

Os quebra-mares destacados são definidos como estruturas rígidas paralelas à costa, que protegem uma seção da linha de praia ao formar um escudo contra as ondas, bloqueando a energia das ondas incidentes. Sua crista pode ser emersa ou submersa e sua altura é da ordem da profundidade local (VAN RIJN, 2011). Segundo Komar (1998), essas obras, analogamente ao campo de espigões, são frequentemente construídas em série, visando proteger uma porção maior da costa, sendo conhecidos como quebra-mares segmentados.

No que concerne ao transporte sedimentar, os sedimentos são capazes de atravessar ao longo da costa entre a estrutura e a orla. Entretanto, a praia gerada a sotamar da estrutura é, normalmente, resultado da ação das ondas na sua zona de

⁴ Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fortaleza,_Brazil_\(6\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fortaleza,_Brazil_(6).jpg)>. Acesso em: 21 dez. 2017.

sombra, na qual a energia ondulatória é reduzida, criando um padrão de difração e refração. Em geral, há três possíveis respostas da linha de costa a um quebra-mar destacado, ilustrado na Figura 24: formação de um tómbolo com uma ligação na estrutura; formação de cúspides atrás de cada estrutura, entretanto sem ligação; ou apenas uma modificação limitada da configuração da linha de costa (KOMAR, 1998).

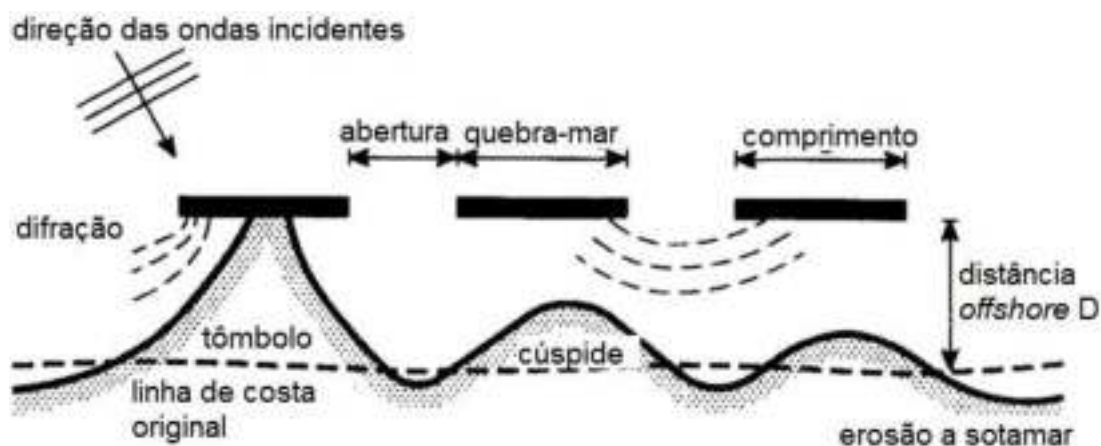


Figura 24. Resposta da linha de costa a quebra-mares destacados.
Fonte: adaptado de Van Rijn, 2011.

As principais vantagens da construção de quebra-mares ao invés de espigões são: possibilidade de modificar o transporte litorâneo de forma mais suave, causando menos erosão nas regiões adjacentes, principalmente se o comprimento da estrutura for suficientemente pequeno, evitando assim, a formação de um tómbolo permanente; e não obstrução do acesso à praia. Em contrapartida, como desvantagens podem ser citadas a redução de qualidade da água das praias devido ao abrigo das ondas; o alto custo de implementação e manutenção das obras; e impacto visual causado pelo bloqueio da visada do horizonte (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017; VAN RIJN, 2011). Na Figura 25 tem-se um exemplo da evolução da linha de costa em resposta à presença de quebra-mares destacados construídos em série no nordeste brasileiro, em Olinda, Pernambuco.



Figura 25. Quebra-mares destacados implementados em Olinda, Pernambuco - Brasil.
Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc.

3.4.2. Obras costeiras leves

A alimentação artificial de praias é uma medida de proteção costeira, sendo considerada de baixo impacto em contraste com as obras rígidas. Tal solução é conhecida como o único meio de defesa e preservação do litoral que visa manter a aparência natural da orla marítima. Ela pode ser utilizada para criar ou manter praias recreativas, ou para aumentar a extensão de areia, protegendo, assim, as propriedades costeiras contra o ataque das ondas e inundações resultantes de tempestades (KOMAR, 1998).

Segundo Mangor et al. (2017), o engordamento artificial pode ser realizado em cinco regiões da área costeira, ilustrados na Figura 26: nas dunas, no pós-praia, na antepraia, na face praial ou ao longo do perfil. É um método tido como deveras natural em combater a erosão, já que ele é responsável por suprir o déficit sedimentar de determinados trechos com o volume de areia correspondente. Entretanto, se há processos erosivos em andamento, estes continuam atuando, uma vez que suas causas não são eliminadas.



Figura 26. Locais da área costeira para depósito de areia utilizada na alimentação artificial, NM: nível médio do mar.
Fonte: adaptado de Mangor et al., 2017.

A eficiência de um projeto de alimentação artificial está diretamente relacionada ao tamanho do grão utilizado, isto é, do material de empréstimo, em comparação ao sedimento natural. As características da areia empregada são as responsáveis por determinar a forma do perfil de equilíbrio resultante, conforme demonstra a Figura 27 (VAN RIJN, 2011; MANGOR et al., 2017). De acordo com Komar (1998), se o sedimento é muito fino, a turbulência das ondas faz com que eles sejam suspensos e derivados para águas profundas, isto é, para além da profundidade de fechamento, o que acarretaria em perdas para a zona litorânea.

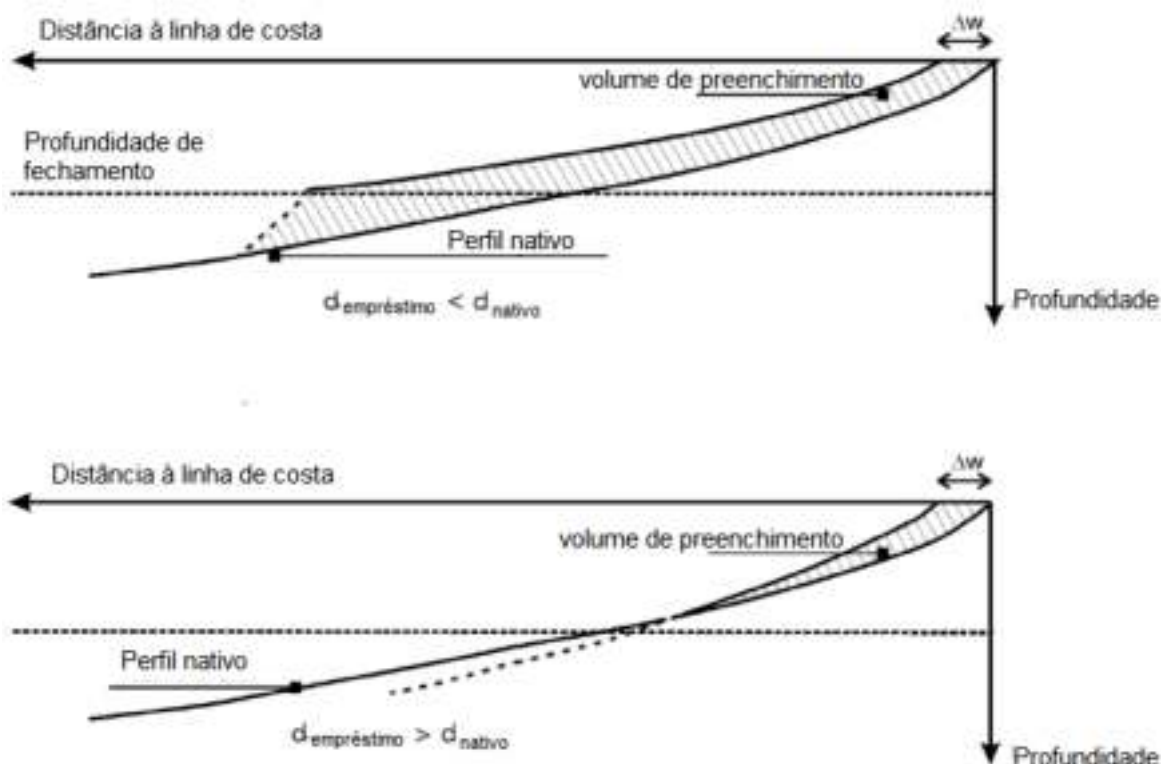


Figura 27. Condições de equilíbrio necessárias para praias alimentadas artificialmente, visando obter uma largura de praia adicional (Δw) com o material de empréstimo para sedimentos mais finos (acima) e mais grosseiros (abaixo) que o natural.

Fonte: adaptado de Mangor et al., 2017.

Uma manutenção regular pode ser requerida dependendo das condições hidrodinâmicas locais, fator que deve ser levado em conta na elaboração de um projeto. Se a frequência necessária de abastecimento for alta, isso acarretaria em altos custos para a sociedade, o que poderia ser impraticável, a não ser que exista um envolvimento coletivo entre os donos das propriedades costeiras e os órgãos responsáveis. Sendo assim, a alimentação artificial constituiria uma solução mais atrativa quando combinada com obras rígidas (MANGOR et al., 2017). Nas Figura 28 e Figura 29, é apresentado um exemplo de alimentação artificial na praia de Copacabana no Rio de Janeiro, podendo ser vistas as situações antes e depois da implementação do projeto.

Em contraste às suas vantagens, Mangor et al. (2017) abordam os impactos ambientais do engordamento de praia, sendo citados: espalhamento de sedimentos finos no ambiente marinho, que podem ser provenientes de uma região contaminada; transtorno ou riscos para as atividades recreativas; e impactos na microfauna presente no fundo oceânico, bem como na flora marinha.



Figura 28. Praia de Copacabana, Rio de Janeiro – Brasil, antes da alimentação artificial de praia.
Fonte: Foto Postal Colombo, 1965.⁵



Figura 29. Praia de Copacabana, Rio de Janeiro – Brasil, depois do engordamento artificial de praia.
Fonte: Tota Maia, s.d.⁶

⁵ Disponível em: <<https://modulacao.wordpress.com/2015/09/01/orla-de-boa-viagem-houve-requalificacao-adequada-por-tota-maia/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

⁶ Disponível em: <<https://modulacao.wordpress.com/2015/09/01/orla-de-boa-viagem-houve-requalificacao-adequada-por-tota-maia/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

Por fim, para maior eficiência, além do reconhecimento dos pontos de sucesso e falha de um projeto de alimentação artificial, Komar (1998) recomenda que sejam realizados monitoramentos periódicos de todos os aspectos da implantação dessa medida.

3.5. Modelagem numérica

A modelagem numérica de processos costeiros é uma ferramenta potente no que diz respeito à quantificação da grande variedade de questões técnicas enfrentada por engenheiros e cientistas. Além de permitir a análise de determinado problema, o modelo também ajuda a avaliar os efeitos das mais diversas estratégias para sua solução e mitigação (MANGOR et al., 2017). Para Komar (1998), as simulações em modelos numéricos têm se mostrado cada vez mais poderosas, sendo utilizadas para avaliar os impactos da construção de molhes e quebra-mares na configuração da linha de costa, replicando ou prevendo os padrões de erosão ou progradação.

Segundo Mangor et al. (2017), o empenho para a calibração e validação de um modelo depende das incertezas envolvidas pela modelagem de processos costeiros e de transporte de sedimentos, e do foco do projeto no que tange a sua precisão. O nível de exatidão necessário pode ser dividido em quatro etapas: 1) quantificação em números absolutos; 2) quantificação das mudanças ou diferenças entre os cenários adotados; 3) análise das tendências; e 4) entendimento dos processos envolvidos. Além desses fatores, é importante atentar para a disponibilidade de dados para calibração e validação, bem como aos custos para obtê-los, e à precisão do modelo escolhido em relação aos esforços despendidos para calibrá-lo e validá-lo.

Entretanto, independentemente da complexidade do programa utilizado, as habilidades e conhecimentos do engenheiro costeiro ou cientista não podem ser substituídos. Os modelos são apenas um auxílio ao profissional, análogos a uma calculadora, isto é, são ferramentas complexas que devem ser utilizadas de forma cuidadosa, levando em conta os conhecimentos sobre a área estudada (MANGOR et al., 2017).

Há vários modelos computacionais disponíveis no mercado. Para a avaliação e entendimento do comportamento das regiões costeiras, bem como identificação de

zonas sujeitas à erosão e deposição de sedimentos, além de outros fenômenos físicos, são utilizados, em geral, modelos morfodinâmicos. Em tais modelos são consideradas condições normais de clima de ondas em contrapartida a caracterizações menos frequentes. Os modelos morfodinâmicos incluem cálculos hidrodinâmicos, isto é, cálculo de ondas e correntes, assim como os morfológicos (transporte de sedimentos por arrastamento de fundo e suspensão) (CARMO, 2016).

Como exemplo de modelos, que serão brevemente descritos a seguir, podem ser citados: Delft3D desenvolvido pela Deltares; SWAN desenvolvido pela *Delft University of Technology*; XBEACH de domínio público e desenvolvido por uma parceria entre UNESCO-IHE DELFT, Deltares, *Delft University of Technology* e *University of Miami*; e MIKE 21, MIKE 3 e LITPACK, desenvolvidos pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute*).

O Delft3D é uma ferramenta de modelagem numérica capaz de reproduzir ondas de tempestade, tsunamis, furacões, fluxos detalhados e níveis de água, ondas, transporte de sedimentos e morfologia, qualidade da água e ecologia, bem como possibilita as interações entre esses processos. Algumas de suas aplicações são: análise dos fluxos de maré e vento; avaliação do transporte horizontal de materiais, em grandes e pequenas escalas; e avaliação dos impactos hidrodinâmicos de obras de engenharia como quebra-mares, diques e recuperação de praias (DELTARES, 2017).

Já o SWAN é um modelo de ondas de terceira geração, que calcula ondas aleatórias geradas pelo vento e de crista curta em regiões costeiras e águas interiores. Ele faz uso das saídas de softwares de simulações hidrodinâmicas, tal como o supracitado Delft3D. Alguns de seus recursos são: propagação de ondas no espaço e no tempo, empolamento, refração devido à corrente e profundidade, deslocamento de frequência devido a correntes e profundidades não estacionárias, geração de ondas por vento, atrito de fundo, propagação da escala de laboratório para escalas globais, transmissão e reflexão contra obstáculos, difração, entre outros (SWAN TEAM, 2017).

O XBEACH, por sua vez, é um modelo bidimensional para propagação de ondas, ondas longas e fluxo médio, transporte de sedimentos e mudanças morfológicas durante tempestades da região litorânea, praias e dunas, e também faz uso das saídas hidrodinâmicas do Delft3D. Dentre seus recursos, podem ser citados: processos hidrodinâmicos de propagação de ondas em águas rasas

(refração, arrebentação e empolamento), transformação de ondas longas (geração, propagação e dissipação) e inundação. Com relação a processos morfodinâmicos, são inclusos transporte de sedimentos de fundo e em suspensão, modificação das dunas e transformação do fundo. É possível, também, simular o impacto de obras costeiras rígidas (XBEACH OPEN SOURCE COMMUNITY, 2017).

O MIKE 21 é um modelo 2D voltado para simulações costeiras e do oceano, ele possui diversos módulos que incluem processos físicos, químicos e biológicos em regiões costeiras ou marinhas. Das aplicações típicas, podem ser citadas: concepção de avaliação de dados para estruturas costeiras e *offshore*; otimização de projeto de portos e estruturas de proteção costeira; avaliação de impactos ambientais causados por infraestruturas marítimas; inundações costeiras e avisos de tempestades; resfriamento e dessalinização de águas e análise de recirculação; previsão das condições da água para operações marítimas seguras, bem como navegação (DHI, 2017b)

Já se tratando do MIKE 3, é um modelo 3D, desenvolvido na mesma plataforma do MIKE 21, e é voltado à modelagem de fluxos em superfícies livres associado a processos sedimentares ou qualidade da água. Dentre suas utilizações, podem ser mencionadas: avaliação de condições hidrográficas para projeto, construção e operação de estruturas e usinas em águas estratificadas; estudos de circulação costeira e oceanográfica, incluindo a dinâmica dos sedimentos finos; avaliação de impacto ambiental de infraestruturas marítimas; e projetos de restauração costeira e marinha (DHI, 2017a).

Por fim, o LITPACK é um modelo voltado para processos e dinâmica litorâneos. Ele é aplicado para o projeto e implementação de estratégias eficientes no que diz respeito à região litorânea, tanto localmente, quanto regionalmente. Tal programa combina processos físicos de ondas, correntes e transporte de sedimentos com simulação numérica. Como principais aplicações podem ser citadas: avaliação do impacto de obras costeiras na dinâmica litorânea; avaliação de diferentes tipos e projetos de construções costeiras, tais como molhes, quebra-mares e portos; otimização de planos de recuperação de praias, tal como a alimentação artificial; design e avaliação da proteção costeira; e avaliação da evolução da linha de costa (DHI, 2017c)

Como dito anteriormente, há uma grande variedade de modelos e ferramentas disponíveis. A escolha do modelo ideal deve ser pautada nos objetivos

para os quais as simulações serão aplicadas, levando em conta todo o conhecimento da região de interesse, bem como os processos presentes.

4. ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) é composta por nove municípios: Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos e São Vicente, como exibido na Figura 30. A RMBS conta com a presença do Parque Industrial de Cubatão e o Complexo Portuário de Santos. Sendo assim, é responsável por, aproximadamente, 2,8% do Produto Interno Bruto (PIB) do estado de São Paulo, além de concentrar cerca de 4% da população estadual, segundo estimativa do IBGE (2016).

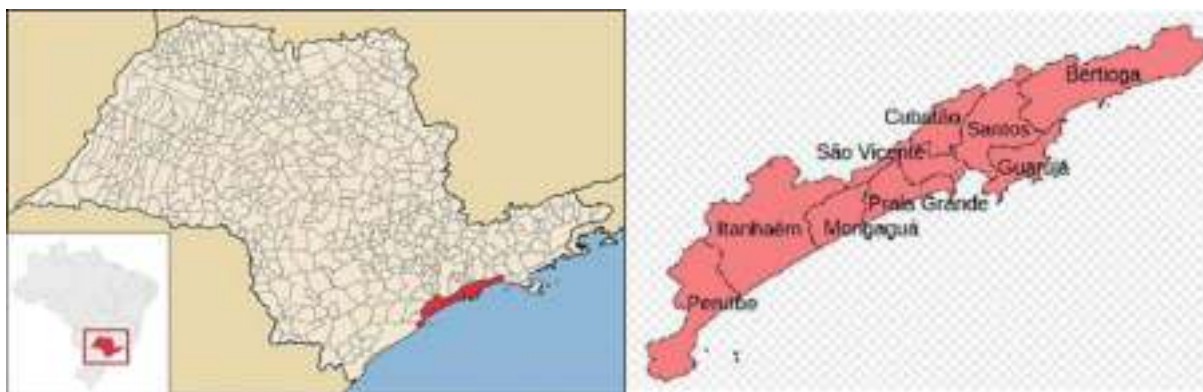


Figura 30. Localização da RMBS.
Fonte: Cunha; Oliveira, 2015.⁷

O município de Santos, por sua vez, é a décima maior cidade do estado de São Paulo e está localizada em seu litoral central, a 72 quilômetros da capital paulista. Possui 419.400 habitantes e um índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM) de 0,840, segundo dados do Censo 2010 do IBGE. Santos lidera o ranking das melhores cidades brasileiras, de acordo com o BCI 100 da consultoria econômica Delta, de outubro de 2014 (DELTA, 2014).

No que diz respeito à economia, a atividade portuária faz com que o município seja o mais relevante da RMBS, já que o Porto de Santos ainda é o maior da América Latina, com 13 quilômetros de extensão. Segundo o relatório de análise do movimento físico do porto, fornecido pela Companhia de Docas do Estado de São Paulo (CODESP, 2016), em 2016 Santos respondeu por 28,5% da balança comercial brasileira, o que corresponde a 92,1 bilhões de dólares movimentados. Tal

⁷ Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/wg6rs>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

participação supera a soma da influência dos outros seis maiores portos brasileiros, correspondente a 88,3 bilhões de dólares movimentados.

Santos, fundada em 1546, é uma das cidades mais antigas do Brasil e passou por muitas modificações ao longo da sua história (IBGE, 2017). FUNDESPA (2010) enumerou diversas intervenções antrópicas que foram realizadas na orla de Santos, Figura 31, dentre elas: construção dos canais de drenagem [1], aterramento do tómbolo da Ilha Porchat [2], implantação do espigão do emissário submarino [3], realização de dragagens do Porto de Santos [4], construção de estruturas rígidas na área do pós-praia [5], entre outras.

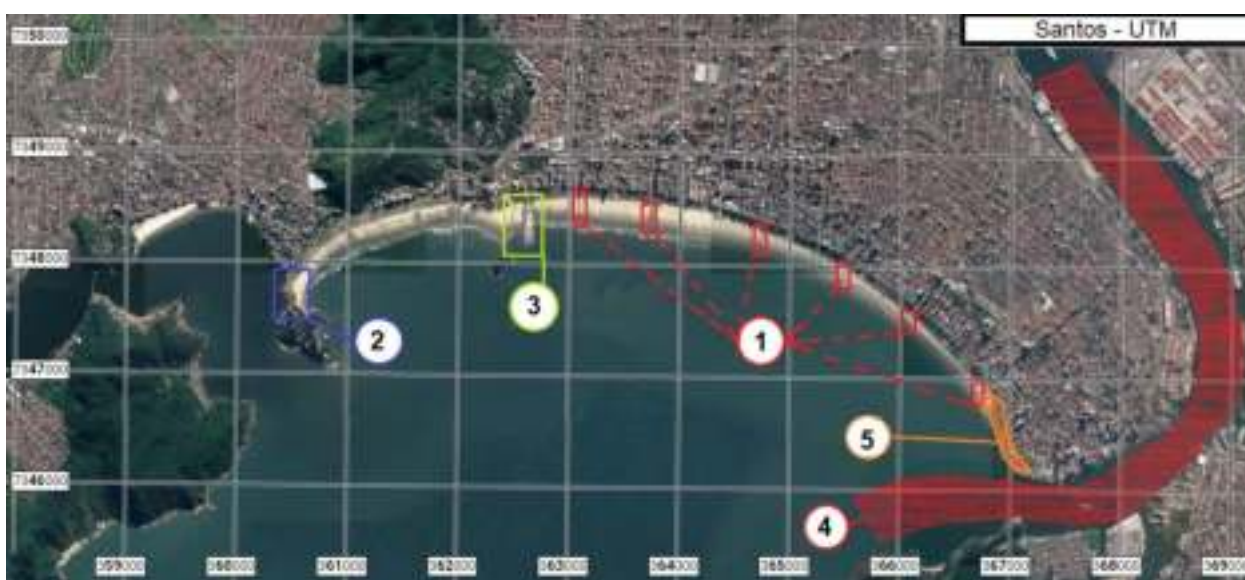


Figura 31. Localização das intervenções na região da Baixada Santista. 1: canais de drenagem do 1 ao 6 (da esquerda para a direita); 2: tómbolo da Ilha Porchat; 3: enraizamento do Emissário Submarino; 4: canal de acesso ao Porto de Santos; 5: muros de praia, enrocamentos e muretas na região da Ponta da Praia.

Fonte: elaborado pela autora.

Segundo (Oliveira; Santos, 2015), devido ao surgimento de epidemias fatais, como malária e febre amarela, houve a morte de mais de 22 mil pessoas na década de 1890 na cidade de Santos. Visando resolver tal problema, o governo do estado criou comissões para realização de obras de engenharia sanitária. Dentre as soluções apresentadas, surgiu o projeto da rede de canais de drenagem a céu aberto, desenvolvido pelo engenheiro Saturnino de Brito. A rede foi construída entre os anos de 1905 e 1927, juntamente a um sistema de esgoto, Figura 32 e Figura 33. Ao longo dos anos, os canais de drenagem passaram por modificações: novas comportas foram instaladas a partir de 1992; em 2001, as comportas foram

automatizadas, estas são abertas apenas quando ocorrem chuvas intensas, pois em período de estiagem as águas dos canais são desviadas para uma estação de pré-condicionamento de esgoto e depois enviadas para o emissário submarino; e, em 2007, os canais foram revitalizados no que concerne à limpeza e manutenção da parte interna, além da reforma de calçadas, muretas e pontes (Oliveira; Santos, 2015).

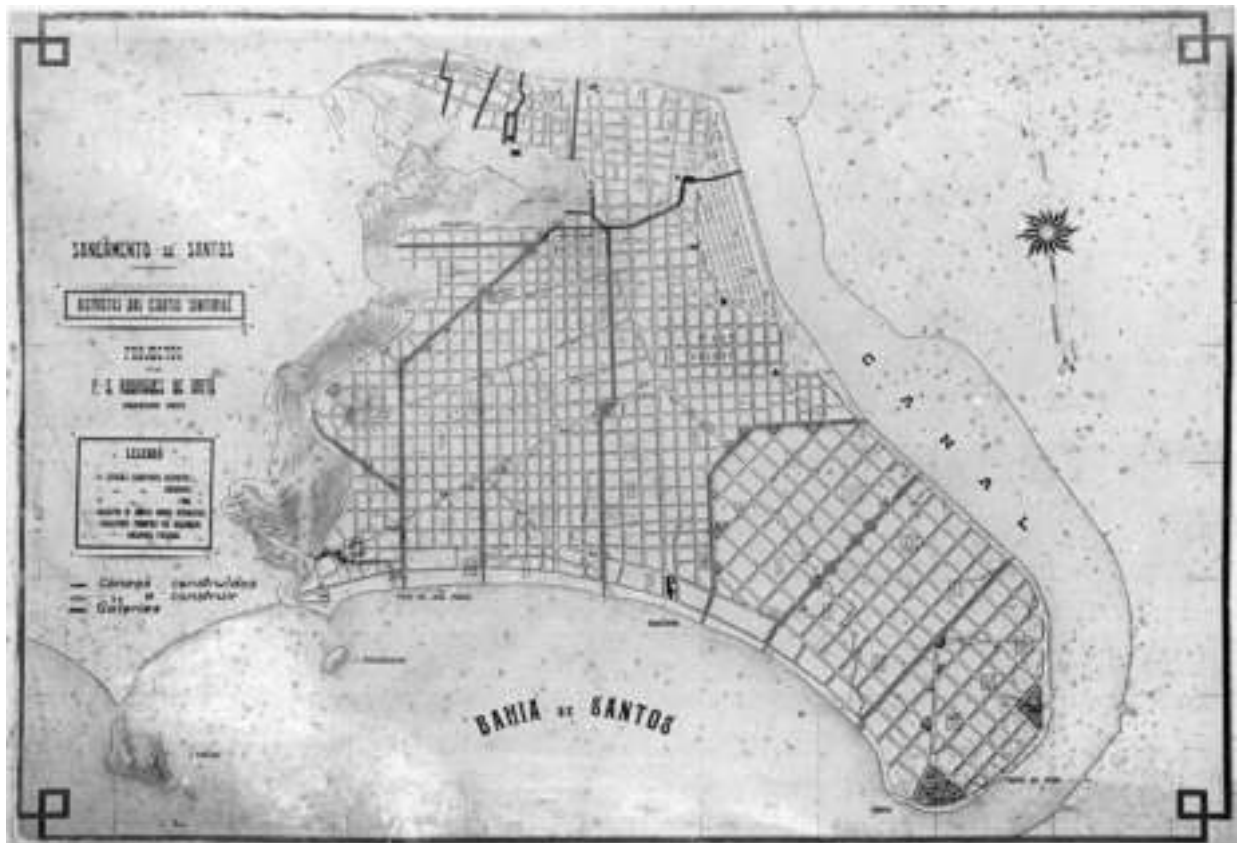


Figura 32. Planta do sistema de canais de drenagem pluvial em Santos, projeto de Saturnino de Brito. Fonte: Acervo FAMS (Fundação Arquivo e Memória de Santos) apud (OLIVEIRA; SANTOS, 2015).



Figura 33. Planta de expansão de Santos de 1910, projeto de Saturnino de Brito.
 Fonte: Inauguração dos Trabalhos de Saneamento de Santos da Comissão de Saneamento de Santos, 1913. Acervo da Biblioteca Municipal Alberto Souza apud (OLIVEIRA; SANTOS, 2015).

A expansão urbana da região santista foi responsável por diversas batalhas entre o poder público e os particulares. Conforme Banat e Nunes (2002), em meados do ano 1921, ocorreram solicitações de aforamentos de trechos da praia, com a justificativa de que não existiam melhoramentos caracterizando a efetiva urbanização da área. Os empresários desejavam criar lotes entre a faixa da praia, na qual a planta rasteira jundu era dominante, e a avenida, que já era existente mesmo sendo de areia. No entanto, a sociedade santista protestou contra tal medida. Antes mesmo da deliberação final a respeito dos pedidos de aforamento, a prefeitura deu início à urbanização da área entre a avenida e a praia, no início da década de 1930. A primeira etapa dessa implantação teve fim em 1939, entre os canais 2 e 3, como visto na Figura 34, onde se encontravam os hotéis mais importantes da cidade (BANAT; NUNES, 2002).



Figura 34. Jardim de orla em meados de 1930/1940, região dos canais 2 e 3. Ao fundo é possível ver a Ilha de Urubuqueçaba.
Fonte: Página Cidade de Santos.⁸

Segundo Banat e Nunes (2002), o prefeito do período de 1953 a 1957 ganhou destaque pelas obras que visavam embelezar a avenida da praia. Também foi responsável por sua duplicação, sacrificando parte dos jardins, entretanto estendendo os mesmos até a Ponta da Praia. Ainda conforme os autores, a década de 1960 é o marco no qual os jardins de orla ganharam o traçado característico atual, (Figura 35). No ano de 2000, Santos entrou para o *Guinness Book* com o maior jardim de orla do mundo (ROSSI, 2013) e em 2010 ele foi tombado como patrimônio histórico da cidade.

⁸ Disponível em:
<https://www.facebook.com/pg/CidadeDeSantos.SP/photos/?tab=album&album_id=300927043308656>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 35. Jardim de orla na década de 1960.
Fonte: Página Cidade de Santos.⁹

Na região da Ponta da Praia, pode-se destacar também a construção do Aquário Municipal de Santos, Figura 36, sendo o mais antigo do país. O parque foi inaugurado em 2 de julho de 1945, contando com a presença do então presidente Getúlio Vargas. Em agosto de 2004 ele foi fechado para reforma e ampliação e reaberto em janeiro de 2006, com 3.223 m² de área construída (VIVA SANTOS, 2017).

⁹ Disponível em:
<https://www.facebook.com/pg/CidadeDeSantos.SP/photos/?tab=album&album_id=300927043308656>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 36. Vista aérea do Aquário Municipal e da Ponta da Praia, 1962.
Fonte: Página Cidade de Santos.¹⁰

Com relação ao tómbolo da Ilha Porchat, seu aterramento foi realizado em meados de 1946 (FUNDESPA, 2010). Segundo Banat e Nunes (2002), o projeto original foi idealizado pelo arquiteto Oswaldo Arthur Bratke e, conforme o decreto que o aprovou, deveria ser “subordinado às características de cidade-jardim, destinando-se os terrenos à construção de casas residenciais e de prédios de apartamento”. Entretanto, a configuração atual da Ilha Porchat, Figura 37, não é a mesma prevista por Bratke, já que houve descaracterização da paisagem devido à construção de edifícios com gabaritos superiores ao permitido no projeto original (BANAT; NUNES, 2002).

¹⁰ Disponível em:

<https://www.facebook.com/pg/CidadeDeSantos.SP/photos/?tab=album&album_id=300927043308656>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 37. Vista aérea da Ilha Porchat, São Vicente.
Fonte: Divulgação SRC&VB, Revista Nove, 2016.¹¹

O Emissário Submarino, por sua vez, foi inaugurado em julho de 1978 (Oliveira; Santos, 2015). O equipamento pertence à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e é responsável por atender as cidades de São Vicente e Santos. A sua estrutura é enraizada na praia no formato de espigão, único trecho visível, contando com uma plataforma de 10 metros de largura por 400 metros de comprimento, Figura 38. Sua tubulação se estendia, originalmente, baía adentro por 3.900 metros, com 1,75 metros de diâmetro, apoiada sobre o assoalho marinho, e possuía uma vazão de 7.000 litros/segundo (FARINNACCIO; GOYA; TESSLER, 2009)

Devido aos investimentos do Programa Onda Limpa, em novembro de 2009, foram acrescentados novos 425 metros de duto (SABESP, 2017). Neste mesmo ano, foi fundado o Parque Roberto Mário Santini, instalado sobre a plataforma do emissário. O projeto foi idealizado por Ruy Ohtake e contempla pistas de *skate*, arquibancada com vista para baía de Santos, jardins, entre outras estruturas voltadas para o lazer, como exibido nas Figura 39 e Figura 40 (BRIGIDO, 2016).

¹¹ Disponível em: <<http://www.revistanove.com.br/ilha-porchat-em-sao-vicente/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 38. Plataforma do Emissário Submarino em meados dos anos 1980.
Fonte: Arnaldo Giaxa, 14 mar. 1987.¹²



Figura 39. Vista aérea da plataforma do Emissário Submarino e da Ilha de Urubuqueçaba.
Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc.

¹² Disponível em: <<http://www.novomilenio.inf.br/santos/h0282i.htm>>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 40. Parque Roberto Mário Santini sobre a plataforma do Emissário Submarino.
Fonte: Portal Memória de Santos.¹³

No que diz respeito às dragagens realizadas no Porto de Santos, estas também podem impactar nas configurações da orla, uma vez que há interferências no volume de controle de sedimentos. Segundo FUNDESPA (2010), até o ano de 1975, os despejos do material dragado eram realizados nas proximidades da Ponta de Itaipu, local substituído pela região da Ponta de Munduba até 1996 e, por fim, foi adotado um quadrilátero ao sul da Ilha da Moela do município do Guarujá, Figura 41, ainda utilizado atualmente para as dragagens periódicas de manutenção. Conforme Gireli et. al (2017), no ano de 2010, foram realizadas atividades de aprofundamento e alargamento do canal do Porto, alterando a profundidade de 13,3 m para 15,0 m e a largura de 150 m para 200 m. Entretanto, o Porto pretende atingir o gabarito de 17,0 m até 2020.

¹³ Disponível em: <<http://www.memoriadesantos.com.br/post/saneamento-basico-em-santos-88/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.



Figura 41. Localização dos pontos de despejo de dragagem do Porto de Santos.

Fonte: Adaptado de Google Earth, ©2015 Google Inc.

Paralelamente às atividades de expansão do porto de Santos em 2010, houve também um aumento da incidência de ressacas. FUNDESPA (2013b) afirma que a década de 2000 foi marcada por uma alta incidência de ressacas, contando com um total de 61 eventos. Além disso, a partir de março de 2010, mesma época do início das atividades de dragagem, os eventos extremos continuaram ocorrendo, não havendo tempo hábil para a região se recuperar dos impactos das ressacas do ano anterior (FUNDESPA, 2013b). Na Figura 42 é apresentada a distribuição anual do número de ressacas até o ano de 2016.

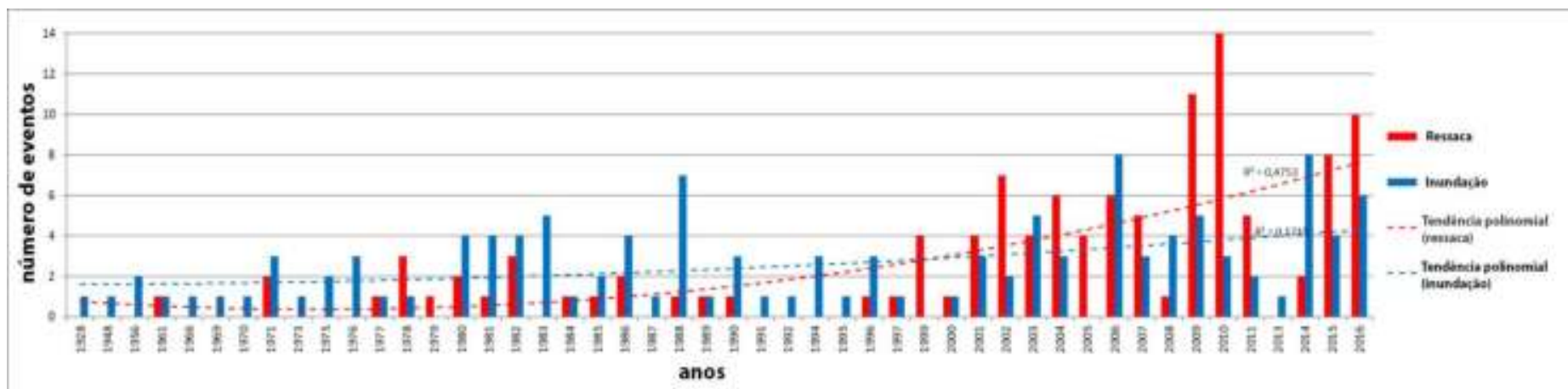


Figura 42. Distribuição anual do número de ressacas.
 Fonte: Adaptado de Souza; Souza; Harari, no prelo.

As intervenções realizadas ao longo dos anos na orla da região de Santos, abordadas neste trabalho, estão sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das intervenções antrópicas na orla de Santos.

INTERVENÇÃO	PERÍODO
Canais de Drenagem Pluvial	1905 a 1927
Sinais da presença da avenida da praia (composta de areia)	1921
Jardins de Orla (Canais 2 e 3)	1935 a 1939
Inauguração do Aquário Municipal	1945
Aterramento tómbolo Ilha Porchat	1946
Inauguração do Emissário Submarino	1978
Alargamento da avenida da praia entre os canais 4 e 5 (pavimentada)	Início da década de 1980
Expansão do Aquário Municipal	2006
Expansão do Emissário Submarino e Inauguração do Parque Roberto Mário Santini	2009
Atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto	2010

Fonte: elaborada pela autora

Muitas dessas obras são responsáveis por diversos impactos em relação à configuração atual das praias: interferindo no seu balanço sedimentar, no perfil praiial característico e na circulação hidrodinâmica, entre outros. O aterramento do tómbolo da Ilha Porchat juntamente com a presença do espigão do emissário submarino, por exemplo, interfere diretamente no transpasse de sedimentos, pois bloqueiam o seu deslocamento das praias da Baía de Santos para as de São Vicente (FUNDESPA, 2010; TESSLER et. al, 2006).

A dragagem do porto, por sua vez, ao retirar materiais do canal de acesso, causa desequilíbrio em um sistema que busca suprir o déficit sedimentar resultante de forma natural. Tal resposta pode acelerar os processos erosivos nos trechos à montante do canal, bem como em suas margens e áreas próximas, como as praias e a plataforma continental (FUNDESPA, 2010). Além do mais, os canais de drenagem, ao desembocarem suas estruturas rígidas na praia, também têm sua

parcela de influência, pois atuam como pequenos espigões e, segundo FUNDESPA (2010), interferem na circulação costeira da região.

De acordo com FUNDESPA (2010), apesar das diversas intervenções e alterações, as praias pertencentes à baía de Santos aparentam manter-se em equilíbrio, com baixo risco de erosão costeira. Entretanto, dada a quantidade de modificações, a duração e magnitude de seus impactos são de difícil previsão e, somado a isso, Tessler et. al (2006) afirma que a circulação hidrodinâmica na região que engloba a geometria costeira, a baía de Santos e seu estuário é altamente complexa. A despeito do suposto equilíbrio das praias de Santos, alguns trechos têm sofrido processos erosivos progressivos (FUNDESPA, 2010), resultando numa diminuição da faixa de areia, como tem ocorrido no trecho entre o Canal 4 e a Ponta da Praia, segmento de interesse do presente trabalho.

A região da Ponta da Praia conta com diversos fatores que influenciam diretamente na sua hidromorfodinâmica. A presença do sistema estuarino santista em suas adjacências, por exemplo, contribui de forma marcante para a complexidade da área de interesse. A configuração morfológica do estuário apresenta múltiplas cabeceiras, possui extensas regiões alagáveis com formação de manguezais e bancos de lama, bem como ligações diversificadas com o oceano. Seu sistema hidrográfico, Figura 43, permite uma subdivisão que resulta em três estuários e uma baía, sendo: Estuário do Canal da Bertioga, Estuário do Canal do Porto de Santos e Estuário de São Vicente, estes dois últimos com suas embocaduras na Baía de Santos (ROVERSI; ROSMAN; HARARI, 2016).

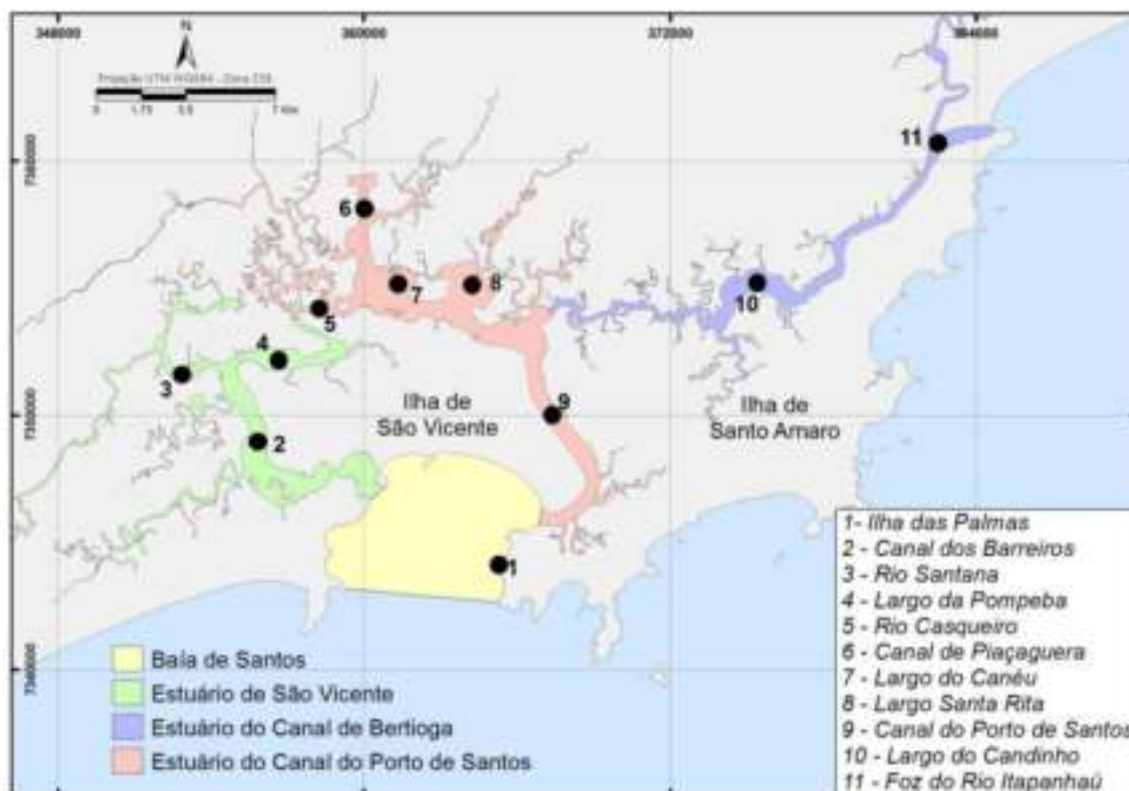


Figura 43. Localização do Sistema Estuarino de Santos e suas subdivisões.

Fonte: Roversi; Rosman; Harari, 2016a.

Somadas a essas características naturais, tem-se também intervenções humanas, na orla santista adjacente ao canal do porto, que incluem: obras longitudinais aderentes, como muros verticais de pedra argamassada combinados com a colocação de enrocamentos em sua base, o que aumenta o índice de reflexão das ondas, acentuando a erosão. Ao observar as Figura 44 e Figura 45, pode-se notar a intensificação dos processos erosivos e, decorrente disso, o aumento da extensão das muretas e enrocamentos, visando proteger os pedestres de possíveis quedas, bem como as estruturas urbanas da incidência de ondas.

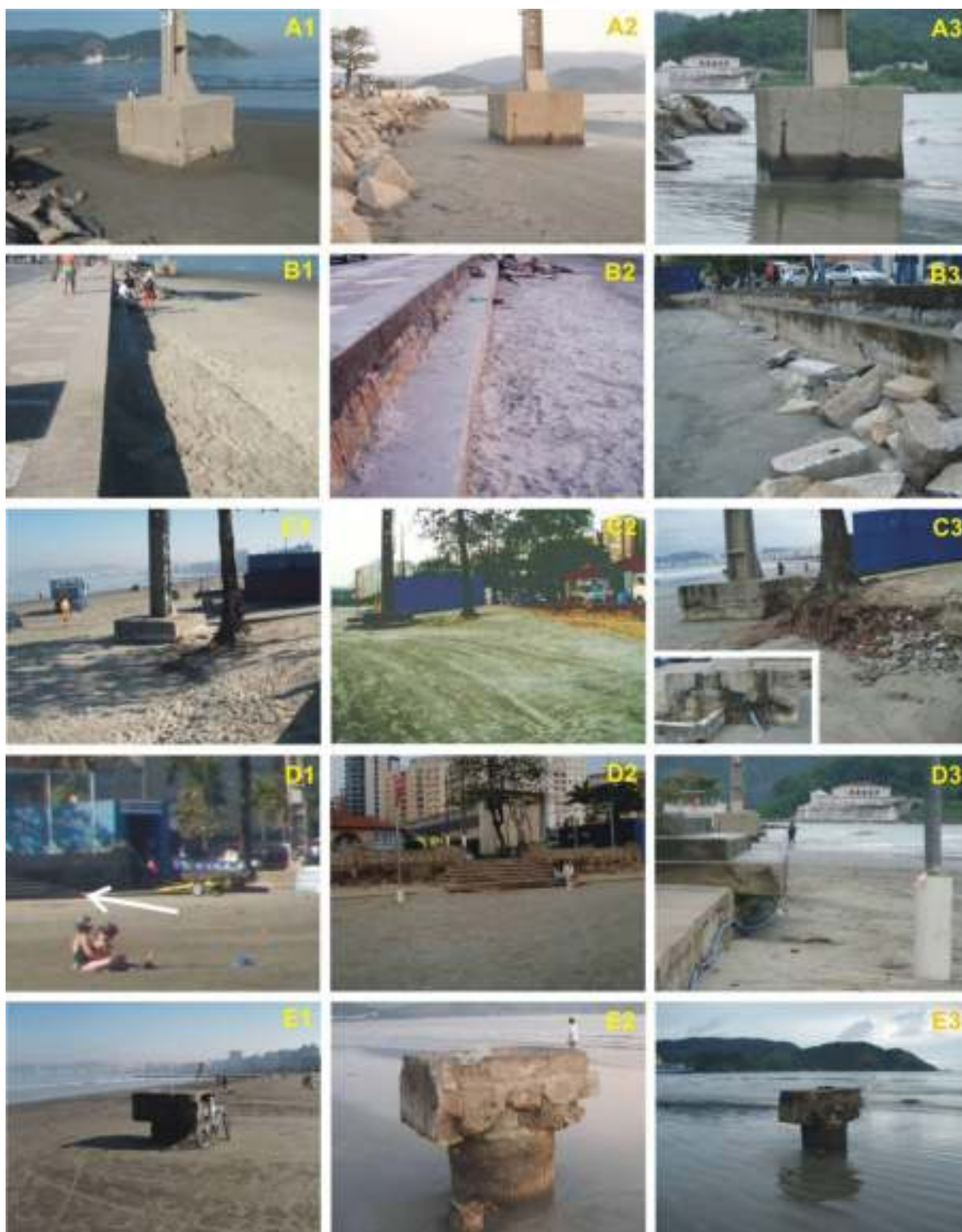


Figura 44. Descalçamento de estruturas urbanas nas proximidades na região da Ponta da Praia. 1: fotos obtidas em 06 de julho de 2010; 2: fotos obtidas em 13 de setembro de 2010. 3: fotos obtidas em 13 de novembro de 2010.

Fonte: FUNDESPA, 2010.



Figura 45. Região da Ponta da Praia em frente ao Aquário Municipal.

Fonte: acervo pessoal, 15 set, 2016.

A região da Ponta da Praia, portanto, está sujeita a diversos fatores e fenômenos que podem ser resumidos em:

- ação de correntes de maré;
- incidência direta de ondas;
- influência hidrodinâmica da embocadura do estuário Santista; e
- presença de estruturas rígidas construídas pelo homem, citadas anteriormente.

A área em questão conta com estudos de monitoramento praias realizados pela FUNDESPA (FUNDESPA, 2010, 2011, 2013, por exemplo), em parceria com o Porto de Santos (PORTO DE SANTOS, 2017), que visavam avaliar os impactos das obras de dragagem de aprofundamento do canal de acesso nas praias adjacentes. Tais estudos incluem os perfis topográficos das praias, bem como a análise do balanço sedimentar das mesmas.

Tendo em vista essa dinâmica complexa, o uso de modelos matemáticos é recomendado para analisar e avaliar o sistema da região com um todo. Baptistelli (2008) cita, em seu trabalho, diversos estudos de modelagem numérica que incluem a Baixada Santista como, por exemplo:

- (i) Estudo realizado pela SABESP, em 2006, para a definição dos padrões de circulação e transporte na região oceânica próxima à Baía de Santos e Praia Grande. Foram adotados dois modelos baseados no

Princeton Ocean Model (POM) adaptado pela ASA (*Applied Science Associates Inc*) *South America*: um de meso-escala (espaçamento horizontal de 1 km) e um de escala local (espaçamento horizontal de 100 metros). E, por fim, as forçantes adotadas foram: maré, vento, estrutura termohalina média, descarga fluvial e forçantes remotas climatológicas;

- (ii) Estudo realizado pela CODESP, em 2002, que engloba modelo hidrodinâmico tridimensional e modelo de transporte lagrangeano para avaliação de dinâmica sedimentar, e um modelo para estudo das ondas. O programa utilizado nas simulações foi o MOHID, com duas batimetrias: uma geral, com espaçamentos de 500 a 4.000 metros, e uma local, com espaçamentos de 450 metros nas fronteiras e 100 metros no interior da baía. A forçante utilizada foi uma onda de maré determinada a partir de um modelo global de marés;
- (iii) Estudo realizado por Harari e Camargo, em 1998, com o objetivo principal de compreender melhor a propagação das ondas de maré e a distribuição espacial das elevações e das correntes de maré na região. Foi utilizado o modelo POM, com espaçamento horizontal de 1.000 metros. As simulações foram realizadas apenas para marés, suas componentes isoladas e maré astronômica completa.

No trabalho de Baptistelli (2008), foram utilizados três softwares diferentes de modelagem numérica hidrodinâmica (MIKE 21, Delft3D e POM) com objetivo de avaliar a dispersão de efluentes na região da Baixada Santista, com ênfase no Sistema Estuarino de Santos/São Vicente. Na Tabela 2, estão apresentados os espaçamentos horizontais adotados na utilização do Mike 21.

Tabela 2. Espaçamento horizontal adotado para o modelo Mike 21 no trabalho de Baptistelli (2008).

Parâmetro	Grade		
	Meso-escala	Baixada	Estuário e Baía de Santos
Espaçamento da grade	2.000 m	300 m	90 m
Número de pontos	25.886 pontos	80.661 pontos	214.131 pontos
"Time Step"	300 segundos	60 segundos	30 segundos
Número total de "Time step"	8.340 "time steps"	35.000 "time steps"	83.400 "time steps"
Intervalo de gravação	6 "time steps"	30 "time steps"	60 "time steps"
Tempo de processamento	3,32 minutos	72,35 minutos	394,25 minutos (6,6 horas)
Tamanho do arquivo	422.091 KB	1.103.441 KB	3.491.366 KB

Fonte: Baptistelli, 2008.

De forma resumida, pode-se dizer que os modelos existentes possuem escalas macro, em contrapartida aos objetivos do presente estudo. Ademais, as caracterizações hidrodinâmicas foram realizadas de diversas formas diferentes, adotando, geralmente, apenas forçantes de maré e ventos. A maior parte dos estudos utilizou a mesma base de dados, isto é, cartas náuticas, folhas de bordo e dados de SONDOTÉCNICA (1977). A utilização de dados antigos para fins de calibração é aceitável. Todavia, para análise da situação atual, é imprescindível a atualização das informações, pois em função das numerosas intervenções ao longo dos anos, há várias alterações significativas na hidromorfodinâmica do local de estudo.

No que concerne aos modelos matemáticos do Sistema Estuarino Santista, a calibração dos tempos de propagação de marés é o principal fator condicionante. O foco dos estudos, em geral, é voltado para o escoamento do estuário, incluindo a renovação de suas águas, intrusão salina e propagação das correntes de maré; além dos efeitos de alargamento e aprofundamento do canal no balanço sedimentar, como podem ser vistos em Souza (2017), exemplificado na Figura 46; Roversi, Rosman e Harari (2016b); IME (2008); Harari e Camargo (2003).

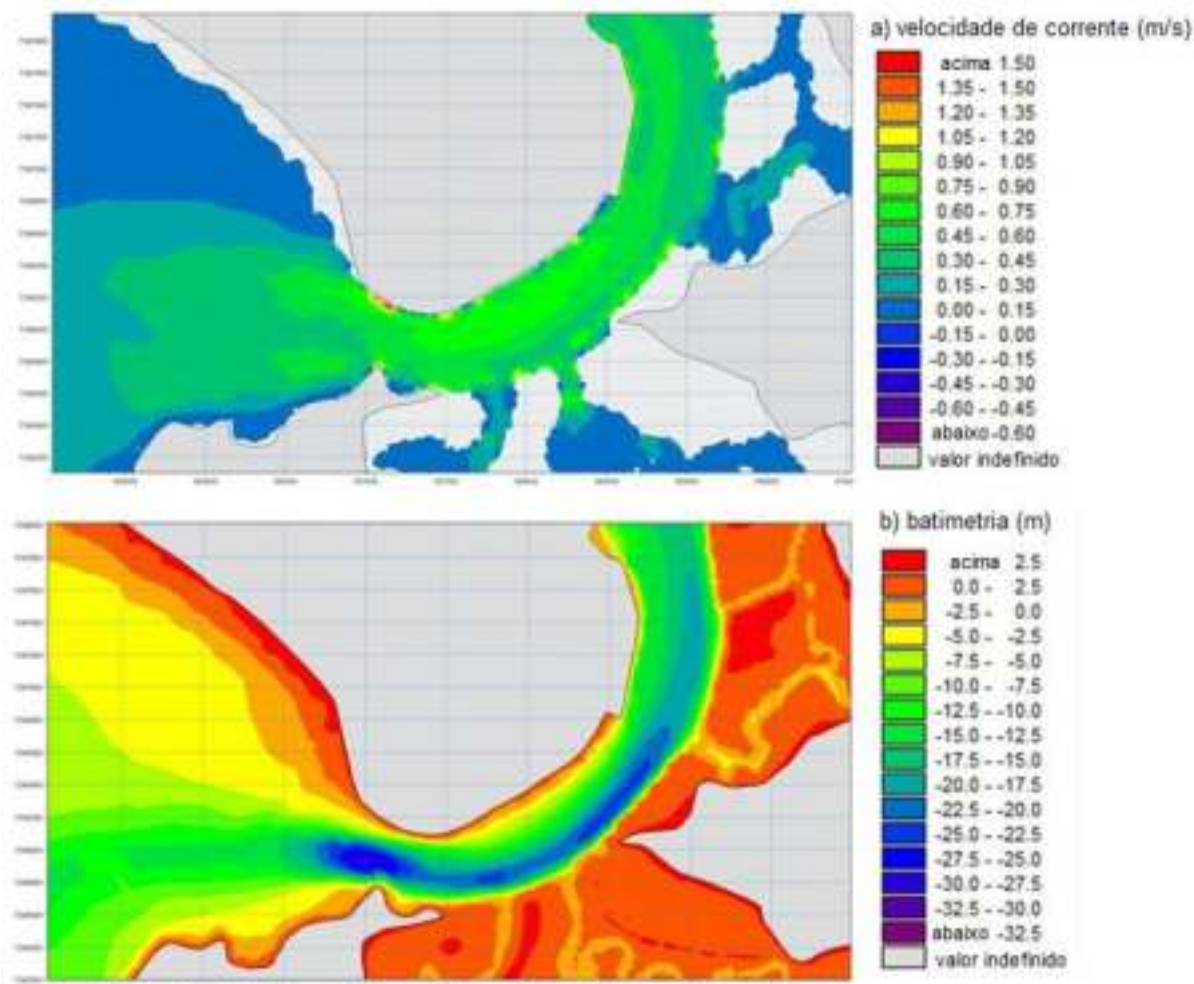


Figura 46. a) velocidade das correntes (m/s) e b) batimetria na região da embocadura do Estuário Santista.

Fonte: Souza, 2017.

A base de dados utilizada para os estudos do Sistema Estuarino é a mesma das caracterizações hidrodinâmicas supracitadas. Roversi, Rosman e Harari (2016b) afirmam que dados precisos de batimetria são encontrados apenas nas regiões mais próximas ao canal do porto, enquanto locais mais internos do domínio, principalmente as áreas alagáveis, apresentam grandes incertezas no que se refere às profundidades. Portanto, pode-se notar que há pouca preocupação em atualizar os dados que não envolvem o canal de navegação.

Complementando os estudos supramencionados, Correa, Souza e Gireli (2016) mostram uma preocupação com as variações do prisma de maré. Os resultados da modelagem, representada na Figura 47, apontaram que mudanças batimétricas e a construção de novos terminais portuários causaram alterações significativas no estuário. Como os sistemas presentes na área de estudo - estuário, baía e praias -

são interligados, é esperado que qualquer intervenção tenha efeitos, de pequena ou grande magnitude, em toda a região costeira adjacente.

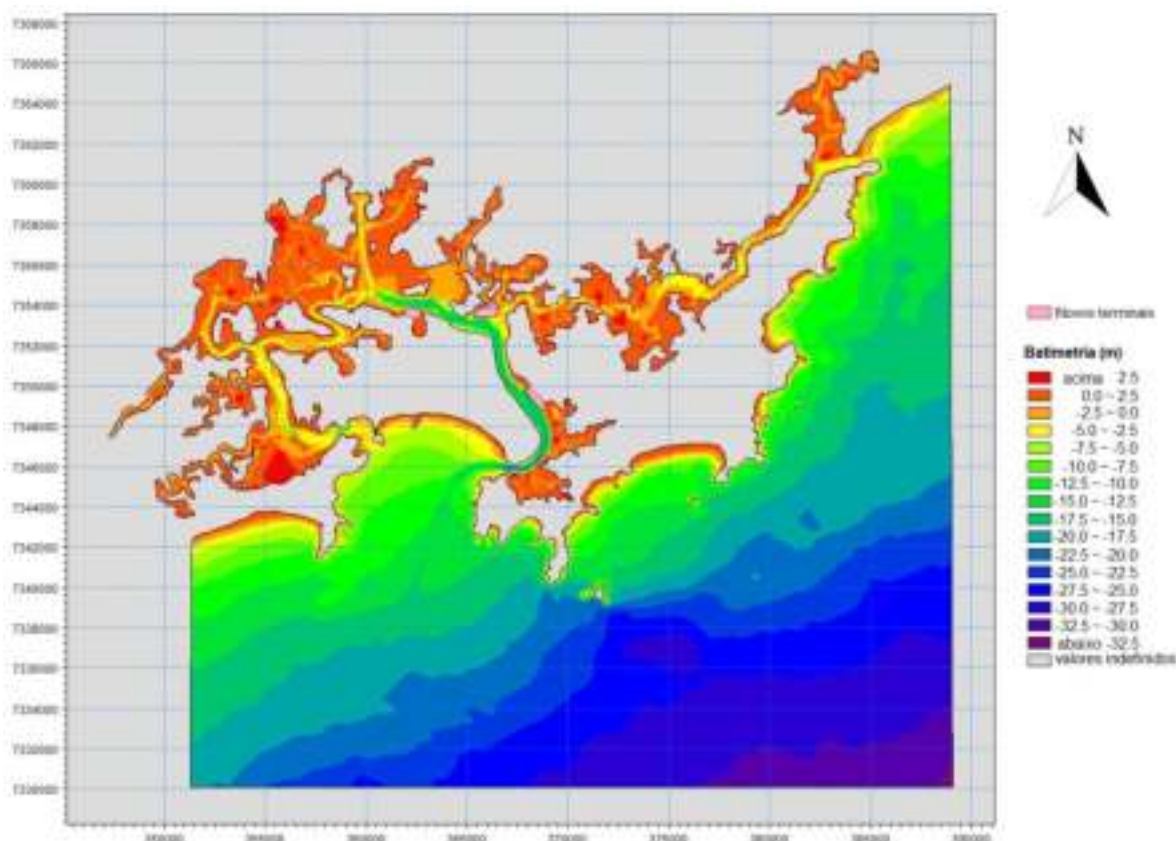


Figura 47. Batimetria aplicada no estudo da alteração prismas de maré devido a mudanças batimétricas e implantação de novos terminais portuários.

Fonte: adaptado de Corrêa; Souza; Gireli, 2016.

As praias e suas dinâmicas foram estudadas, em sua maioria, com foco em monitoramento praias e análises geológicas, como pode ser visto nos estudos de Souza (2009), (SOUZA; SOUZA; FERREIRA, 2012) e FUNDESPA (2010, 2011, 2013, 2014), e ilustrado nas Figura 48 e Figura 49.

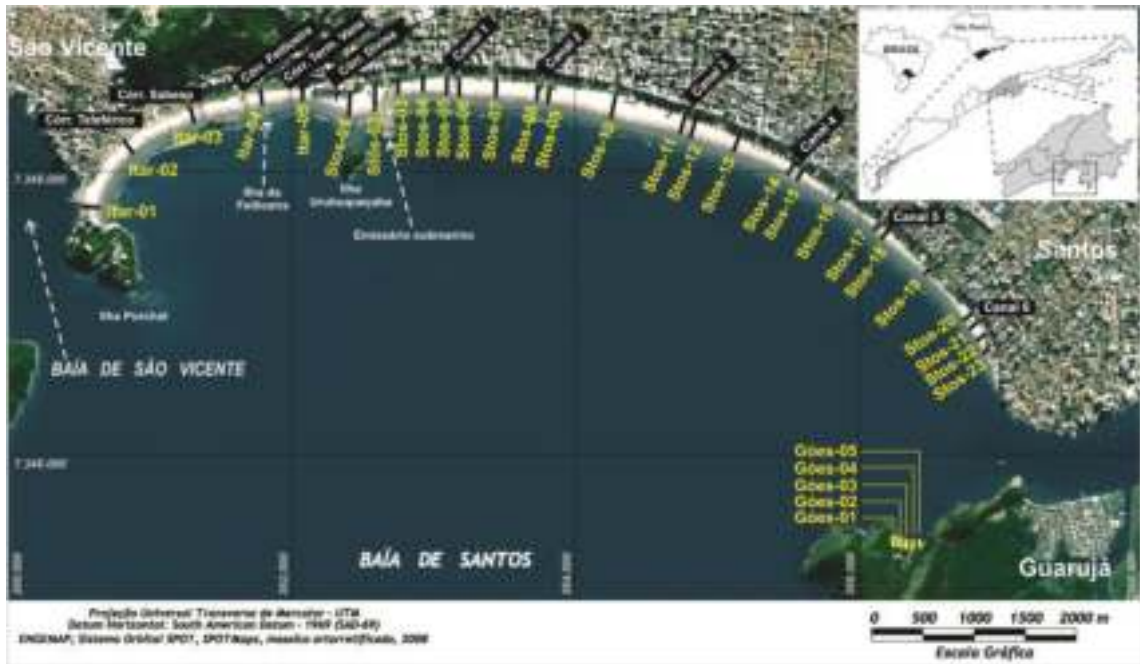


Figura 48. Localização dos perfis de monitoramento praiado do estudo de FUNDESPA (2010, 2011, 2013, 2014).

Fonte: Souza; Souza e Ferreira, 2012.

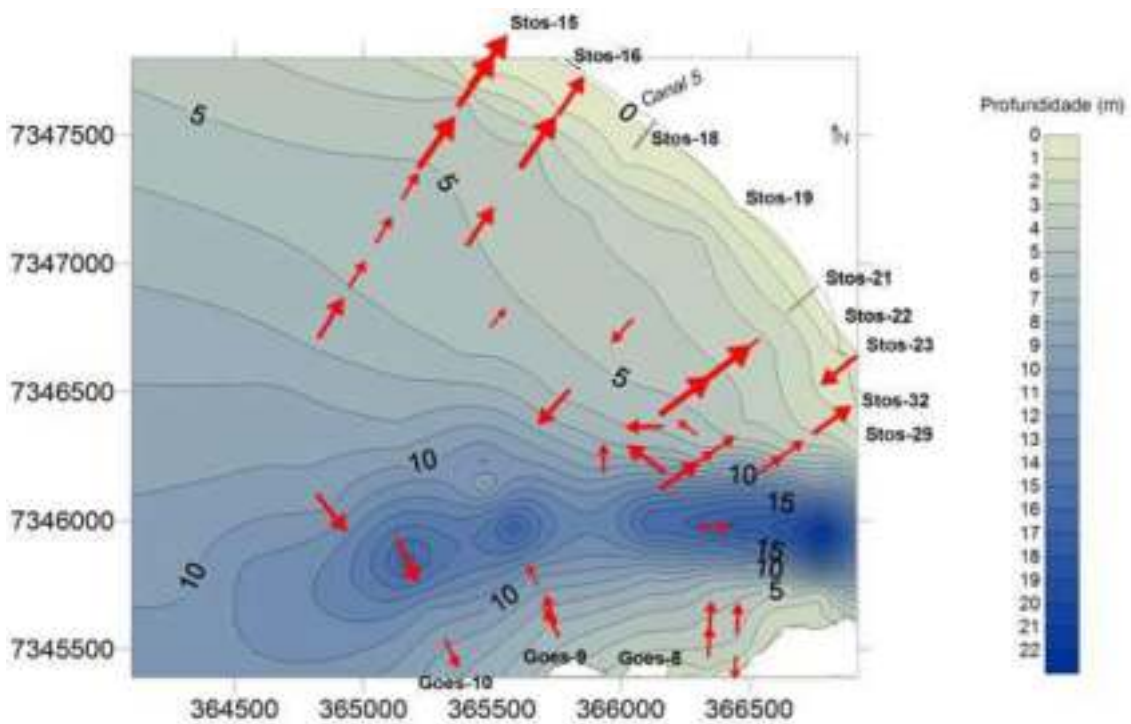


Figura 49. Sentindo do transporte sedimentar residual na região da Ponta da Praia em 2013.

Fonte: FUNDESPA, 2014.

Com relação a estudos mais recentes, o realizado por FCTH (2017), por exemplo, utilizou duas modelagens distintas: uma hidrodinâmica e outra do efeito de ondas. Tal método resultou numa análise de resultados de forma separada, isto é, não foi considerada a interação das ondas com a hidrodinâmica da região. Uma avaliação particionada do sistema costeiro pode produzir resultados não condizentes com a realidade, pois quando se trata de regiões costeiras, todas as condicionantes estão atuando ao mesmo tempo, isto é, temos a combinação de correntes, ondas, marés, ventos e transporte de sedimentos. Na Figura 50 é apresentada uma saída de propagação de ondas do modelo SWAN.

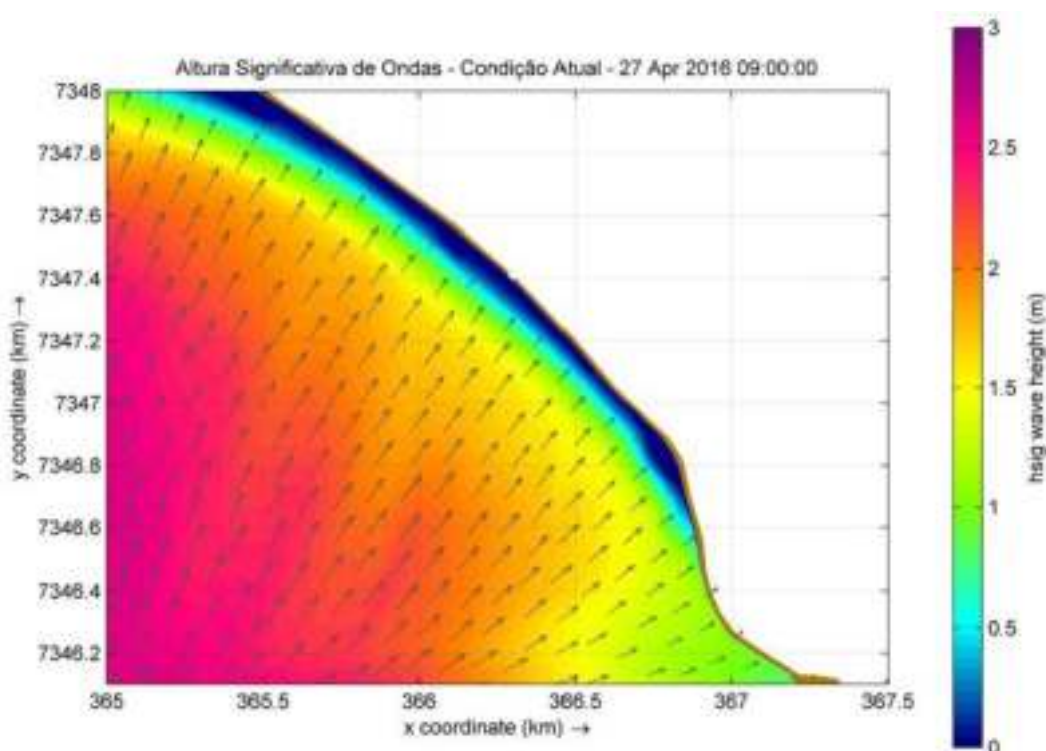


Figura 50. Propagação de ondas na região de estudo extraída do modelo SWAN.
Fonte: FCTH, 2017.

Já na Figura 51 é apresentada uma saída do modelo de transporte de sedimentos onde se notam:

- Transporte longitudinal costeiro resultante negativo entre a ponta da praia e Canal 6, ou seja, em direção ao Canal do Porto de Santos, destacado à direita da figura;
- Tendência a deposição de material a frente do Canal 6 por consequência da diminuição de magnitude do transporte de sedimentos na região, destacada à esquerda da figura.

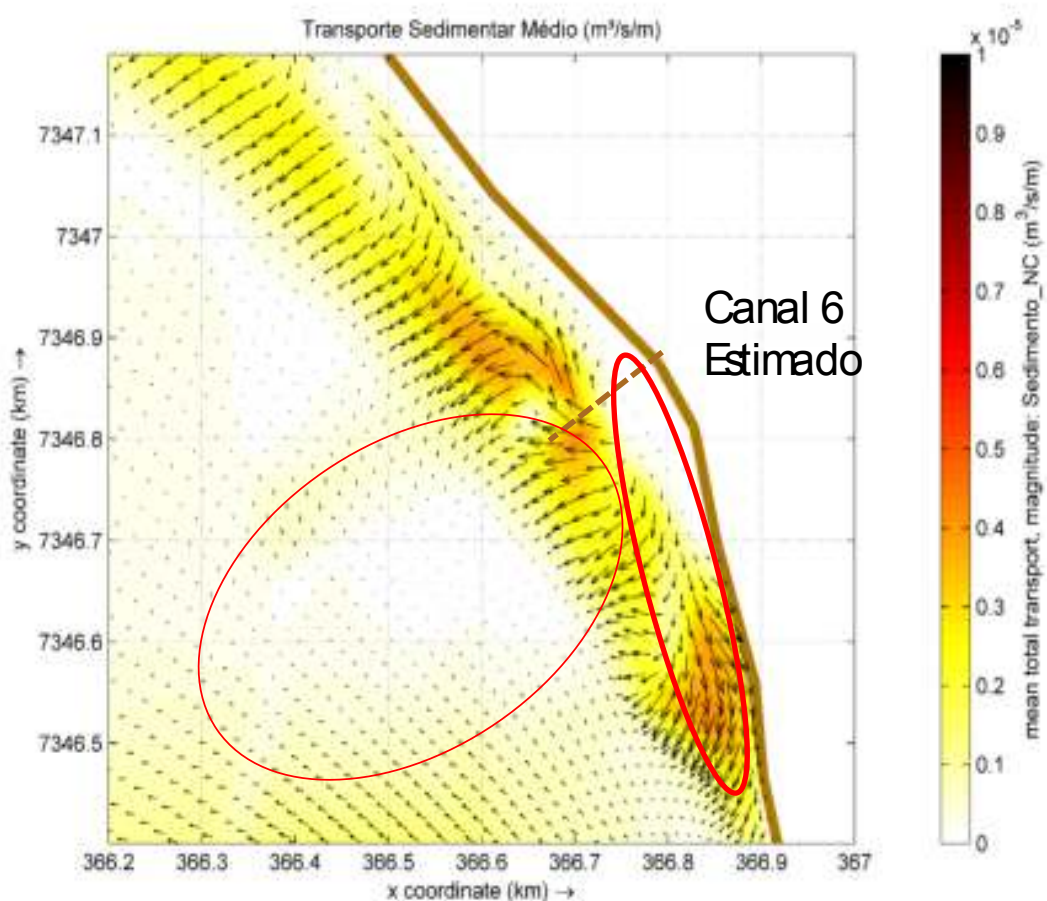


Figura 51. Modelo de Transporte de sedimentos, para região de estudo, obtido pela ferramenta DELFT3D.
Fonte: FCTH, 2017.

Há diversos estudos sobre modelagem matemática envolvendo Santos. Entretanto, em geral, eles utilizam escalas macro, com grandes espaçamentos de grade, condição que pode tornar inviável a representação fiel de trechos específicos, como a região da Ponta da Praia. Por fim, como explicitado ao longo deste capítulo, essa região possui uma dinâmica complexa e é necessário levar em conta a combinação de três sistemas: praia, baía e estuário. Somente assim será possível obter um entendimento mais detalhado dos processos erosivos existentes.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em duas partes principais no que concerne à sua metodologia:

- Levantamentos de dados de campo do tipo topográficos e batimétricos, e obtenção de dados remotos (utilizando a ferramenta Google Earth®). Essas informações foram utilizadas para a análise da variação da linha de costa e do volume erodido na região compreendida entre a Ponta da Praia e o Canal 4, para o período entre 2009 e 2017;
- Modelagem numérica hidrodinâmica e de ondas espectrais para avaliação da hidromorfodinâmica da área de estudo. Nesta etapa foram consideradas três condições topobatimétricas: uma antes das atividades de dragagem de alargamento e aprofundamento do canal do Porto, realizadas em 2010; e duas depois da dragagem, como serão detalhadas no item 5.2.

5.1. Dados de campo

5.1.1. Levantamentos de campo

Os levantamentos de campo realizados para este trabalho foram de dois tipos: topográfico e batimétrico. A metodologia adotada em campo, bem como os equipamentos utilizados, estão detalhados nos itens a seguir.

5.1.1.1. Georreferenciamento e levantamento topográfico

O levantamento topográfico fez uso de pontos georreferenciados em trabalhos de campo realizados entre 2014 e 2017. Nestes, foi estabelecida uma poligonal enquadrada, isto é, um conjunto de alinhamentos consecutivos constituídos de ângulos e distâncias, em que os pontos de partida (início) e de chegada (término) têm suas coordenadas determinadas. Estas foram estabelecidas por meio de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System) apoiados na Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, utilizando o DATUM Sirgas 2000, o que permite determinar os erros de fechamento, tanto lineares quanto angulares, conforme

preconiza a norma NBR 13.133/1994 (Execução de levantamento topográfico) (ABNT, 1994). Tal poligonal engloba a região entre a extremidade da praia e o Canal 4 (Figura 52). Além de seus pontos constituintes, foram materializados (por meio de pregos fixados à calçada) pontos de interesse para o levantamento de seções transversais irradiadas, isto é, seções perpendiculares à linha de costa.

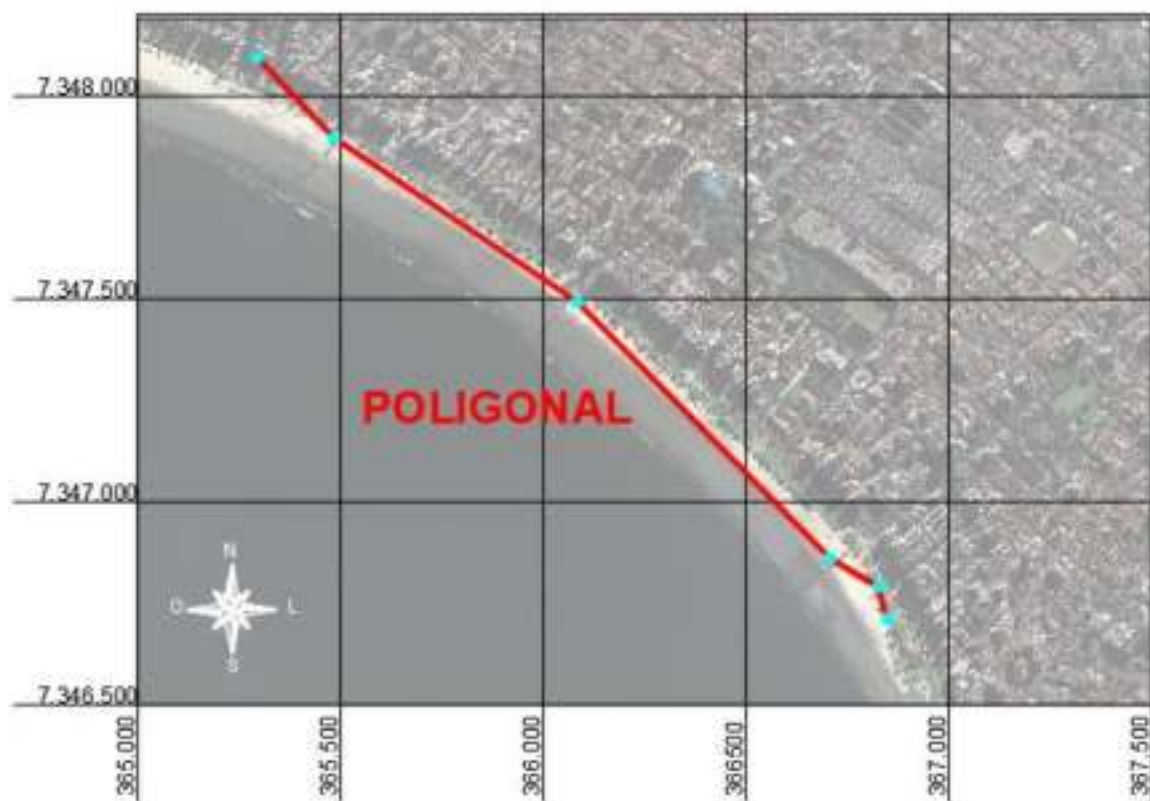


Figura 52. Poligonal do levantamento topográfico.
Fonte: elaborado pela autora.

As operações de campo ficaram a cargo da equipe juntamente ao técnico de laboratório do Departamento de Geotecnia e Transportes (DGT) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Para o levantamento topográfico foi utilizada uma estação total TC305 da Leica®. O georreferenciamento, por sua vez, foi realizado com auxílio de equipamento GNSS Hiper Lite Plus da Topcon®, no modo pós-processado; com precisão horizontal de $(3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times \text{distância})$ e precisão vertical de $(5 \text{ mm} + 1,4 \text{ ppm} \times \text{distância})$. Ambos os equipamentos são exibidos na Figura 53.



Figura 53. Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita).
Fonte: acervo pessoal, maio, 2014.

As altitudes determinadas pelo receptor GNSS, por sua vez, são dadas em relação a um elipsóide de referência. Entretanto, a obtenção de altitudes ortométricas (em relação ao nível médio do mar) pode ser realizada por um modelo de ondulação geoidal. Para esta conversão, o IBGE fornece o programa MAPGEO2010, por meio do qual, tendo em mãos as coordenadas dos pontos, é possível calcular a altura geoidal. Após a obtenção da altitude ortométrica, referenciada no datum vertical de Imbituba SC, foi necessária uma segunda correção de altitude, para o Nível de Redução da Marinha, que corresponde à média das baixa-mares de sizígia. No caso de Santos, o Nível de Redução está a -0,79 m em relação ao nível médio do mar, como indicado na ficha de descrição da estação maregráfica de Torre Grande (Figura 54).

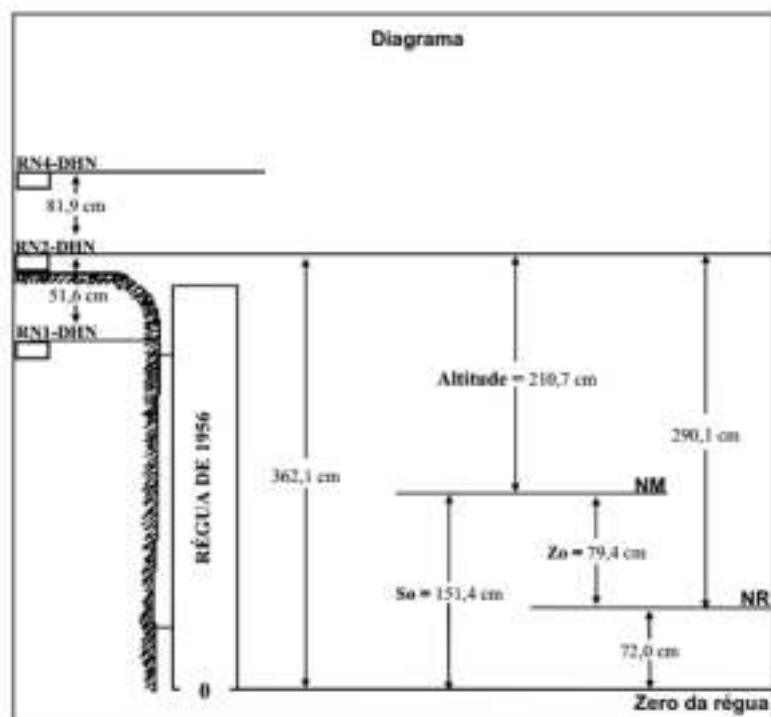


Figura 54. Régua da estação maregráfica de Torre Grande em Santos, São Paulo, Brasil.
Fonte: MARMIL, 2008.

Foram realizados seis levantamentos de campo, com as datas e estações do ano apresentadas na Tabela 3, de forma a se obter tanto perfis de “bom” e “mau” tempo (perfis de tempestades, como é o caso das ressacas), quanto o comportamento morfológico durante as estações do ano.

Tabela 3. Datas e área estudadas durante os levantamentos de campo.

LEVANTAMENTOS REALIZADOS	ÁREA DE ABRANGÊNCIA DAS SEÇÕES LEVANTADAS	ESTAÇÃO DO ANO
08 de maio de 2014	Canal 4 à Seção 1	Outono
03 de outubro de 2014	STOS-21 e Seção 1	Primavera
06 de fevereiro de 2015	Canal 5 à Seção 0	Verão
09 de maio de 2015	Seção 8 à Seção 0	Outono
15 de setembro de 2016	Seção 8 à STOS-22	Inverno
23 de março 2017	Seção 8 à Seção 0	Outono

Fonte: elaborada pela autora.

As áreas cobertas por cada levantamento são apresentadas nas Figura 55 e Figura 56, as seções denominadas “STOS-32 à STOS-15” foram estabelecidas por FUNDESPA (2010), enquanto que as seções “Seção 0 à Seção 8” foram estabelecidas pela equipe de campo. Lembrando que o principal foco deste trabalho

foi a região entre a extremidade da praia e o Canal 6, por isso nem todas as campanhas cobriram os mesmos trechos. A extensão das seções transversais, levantadas pela estação total, é dada do limite superior da pós-praia (com ponto inicial em um prego fixado na calçada) até o início da zona de surfe, já que tal método, ilustrado na Figura 57, é limitado ao alcance do portador do prisma. Tentou-se, sempre que possível, manter um alinhamento perpendicular à linha de costa, porém este fator era diretamente dependente das condições de campo (presença de guarda-sóis, coqueiros, cadeiras, entre outros, para a parte emersa; correntes e ondas para a parte submersa).

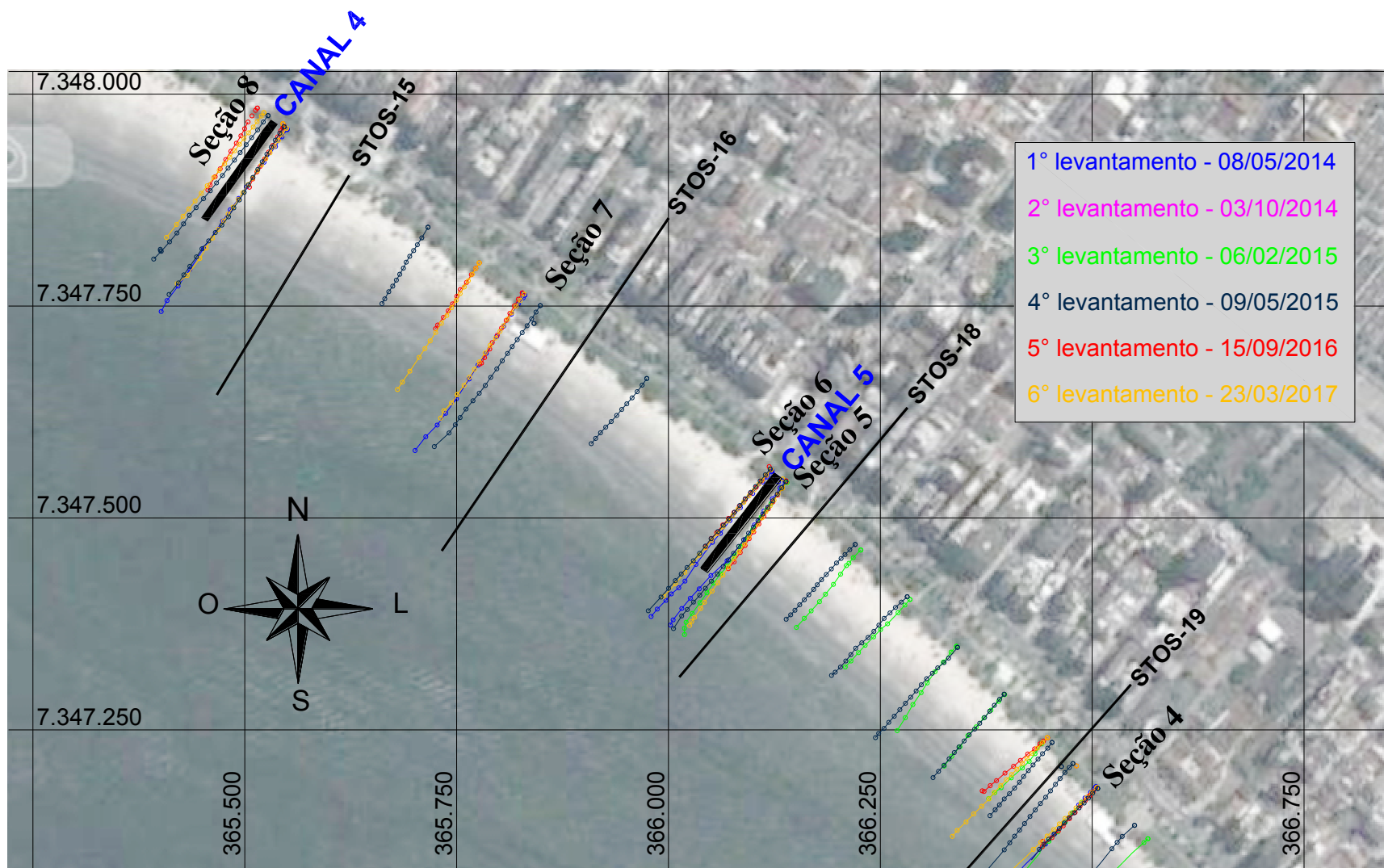


Figura 55. Seções levantadas no trecho entre o Canal 4 e STOS-19.

Fonte: elaborado pela autora.

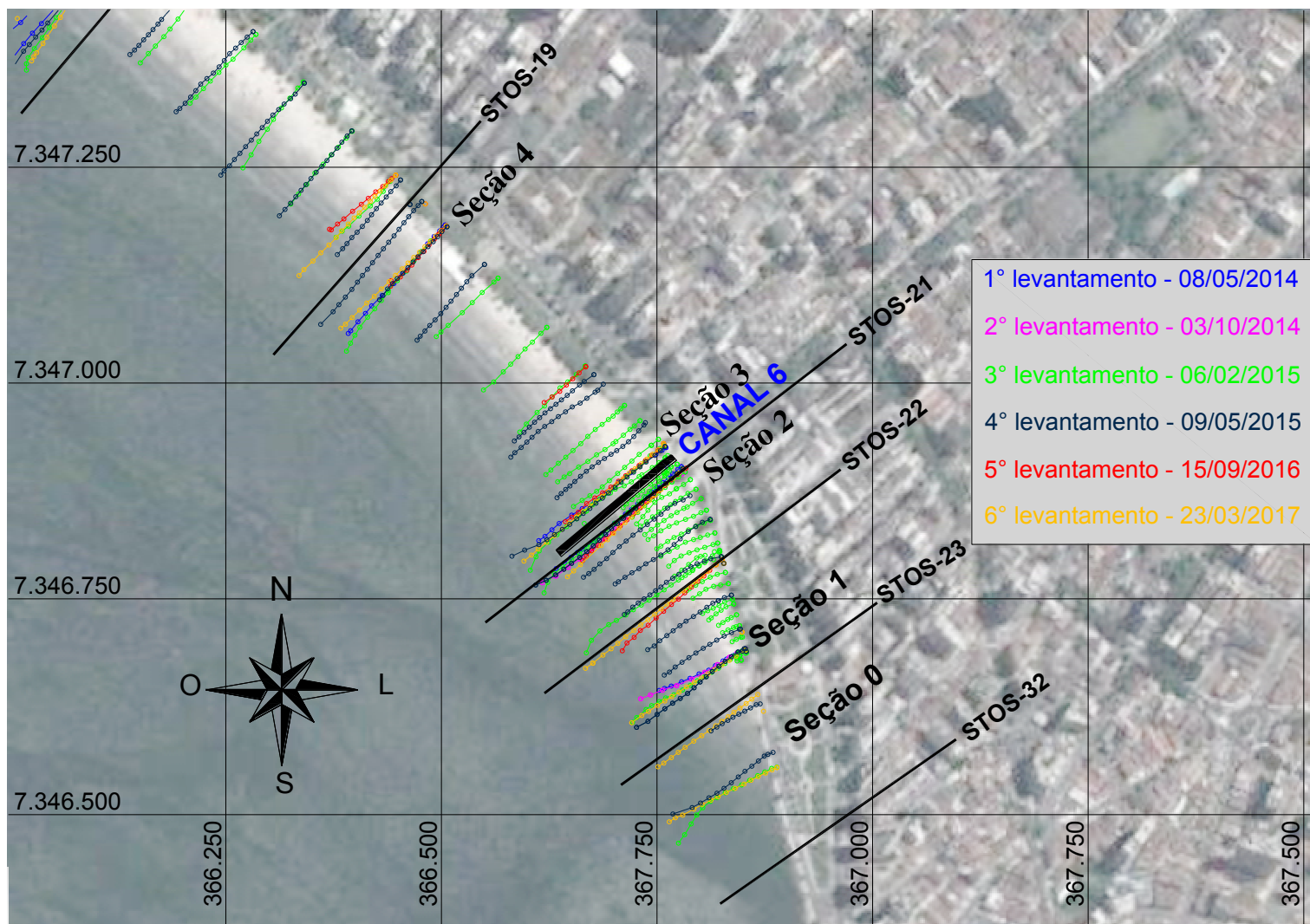


Figura 56. Seções levantadas no trecho entre a STOS-19 e a extremidade da praia.

Fonte: elaborado pela autora.



Figura 57. Levantamento topográfico utilizando Estação Total.
Fonte: acervo pessoal, maio 2015.

5.1.1.2. Levantamento batimétrico

Para o levantamento batimétrico, realizado apenas no dia 28 de setembro de 2016, foi utilizado o ecobatímetro SyQwest, modelo Bathy-500M, Figura 58, acoplado ao sistema de posicionamento GNSS citado no item 5.1, com transdutor de simples frequência de 200 kHz, devidamente calibrado. Esses equipamentos foram fixados a uma embarcação e, por meio deles, foram obtidos os perfis praiais que estão além da linha externa da arrebentação.



Figura 58. Ecobatímetro utilizado para coleta de dados de campo.
Fonte: acervo pessoal, setembro 2016.

Para tal procedimento, foram necessárias, minimamente, três pessoas: a primeira, responsável pela navegação, criando uma malha de trajetórias, ou seja, percursos paralelos e perpendiculares à praia, de forma a cobrir toda a região de interesse; a segunda, responsável pelo controle do ecobatímetro e da manutenção das posições do transdutor e do receptor GNSS, de forma a obter os dados corretamente; a terceira foi responsável pelo manuseio do computador que faz a aquisição das informações em tempo real por meio do programa HYDROpro Navigation®, da Trimble, como pode ser visto nas Figura 59 e Figura 60. Esse *software* registra os horários, posicionamento geodésico e nome de cada ponto de profundidade coletado. Os dados obtidos foram posteriormente processados, como será detalhado a seguir.



Figura 59. Levantamento batimétrico em execução.
Fonte: acervo pessoal, setembro 2016.

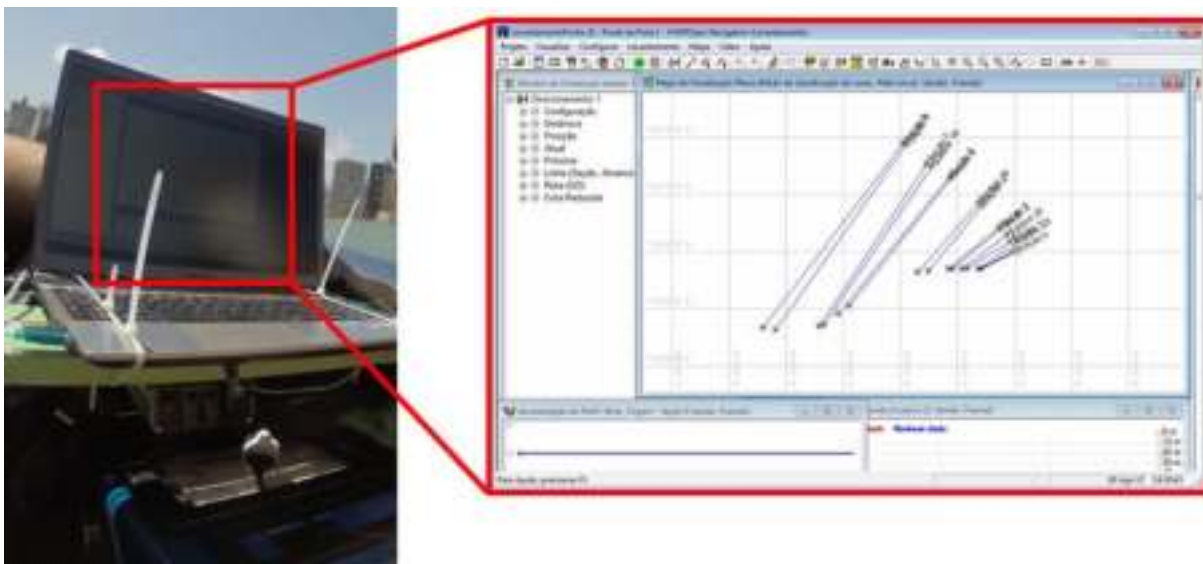


Figura 60. Coleta de perfis batimétricos em tempo real por meio do software HYDROpro Navigation®, da Trimble.

Fonte: elaborado pela autora.

5.1.2. Processamento dos dados de campo

Assim como os levantamentos de campo, os dados topográficos e batimétricos foram processados de modos diferentes, de acordo com as especificidades de cada um, principalmente as referências de nível. Entretanto, a manipulação dos dados foi dada de forma que o resultado final, isto é, informações-base para a criação de um modelo digital de elevação (MDE), fossem compatibilizadas para o mesmo referencial, de maneira que as superfícies de nível geradas pudessem ser utilizadas combinadas.

5.1.2.1. Dados topográficos

Os dados obtidos pelo levantamento topográfico são pontos georreferenciados, apresentando assim, identificação, cota e coordenadas. O tratamento dos dados procedeu-se na seguinte ordem:

- (a) Os pontos coletados já com as devidas correções de nível detalhadas no item 5.1.1.1 (com respectiva identificação, cota e coordenadas) foram importados para o *software* AutoCAD Civil 3D®, da Autodesk;
- (b) Traçaram-se linhas auxiliares ligando os pontos de mesma cota para facilitar a geração da superfície, visto que as distâncias entre os perfis coletados são

grandes e o *software* não realiza uma interpolação adequada, tal como seria a declividade da praia na situação real;

- (c) Gerou-se a superfície de nível da área de estudo (Figura 61);
- (d) Traçaram-se linhas conforme a localização das seções transversais de referência para a obtenção dos perfis topográficos. Optou-se, também, por adotar as posições das seções transversais já utilizadas por FUNDESPA (2010) nos relatórios de monitoramento praial. Adotando este método, o mesmo alinhamento é sempre mantido.

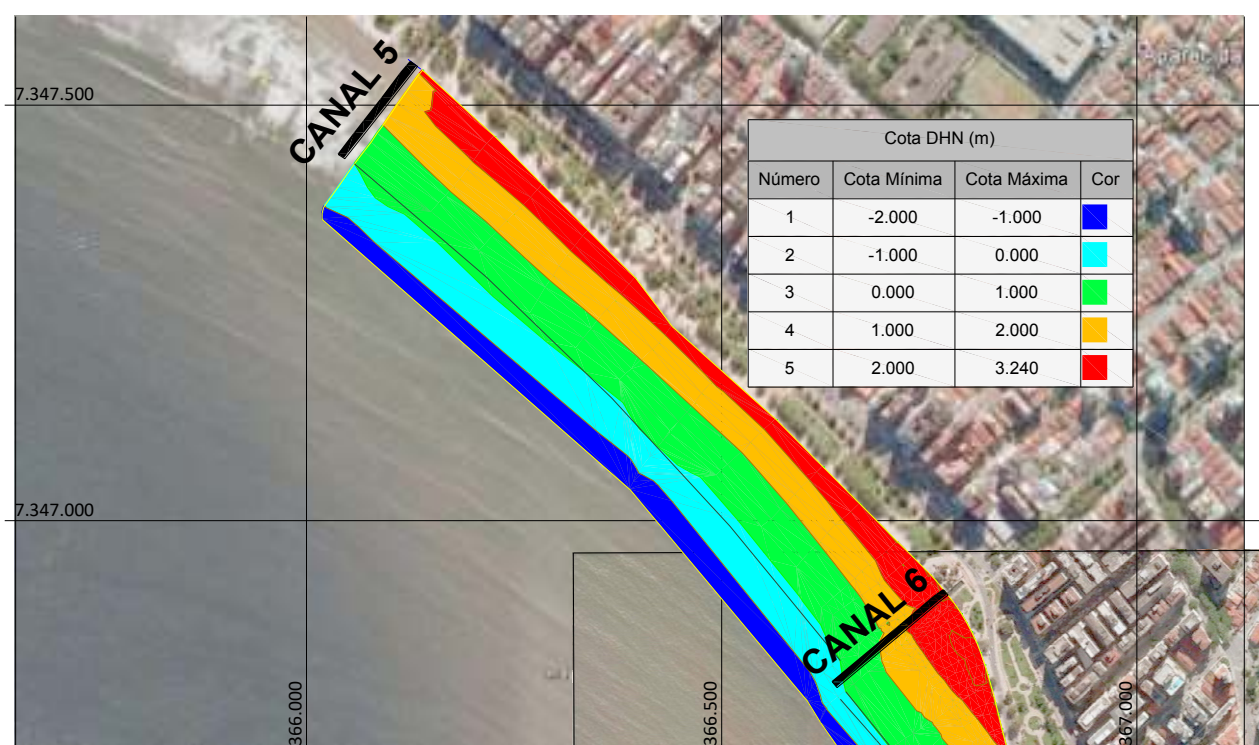


Figura 61. Exemplo de superfície de nível referente ao levantamento 06 de fevereiro de 2015.
Fonte: elaborado pela autora

5.1.2.2. Dados batimétricos

Para o tratamento dos dados batimétricos, utilizou-se o programa HYDROpro NavEdit®, Figura 62, também da Trimble, no qual se insere um arquivo com as informações de maré da estação mais próxima para o dia do levantamento, neste caso a régua de maré da Praticagem do Porto de Santos. Dessa forma, foi possível fazer a correção das profundidades levando em conta as alterações do nível d'água. Ao fim da edição, gerou-se um arquivo de saída composto de pontos compatível com o AutoCAD Civil 3D®, gerando a partir daí o MDE.

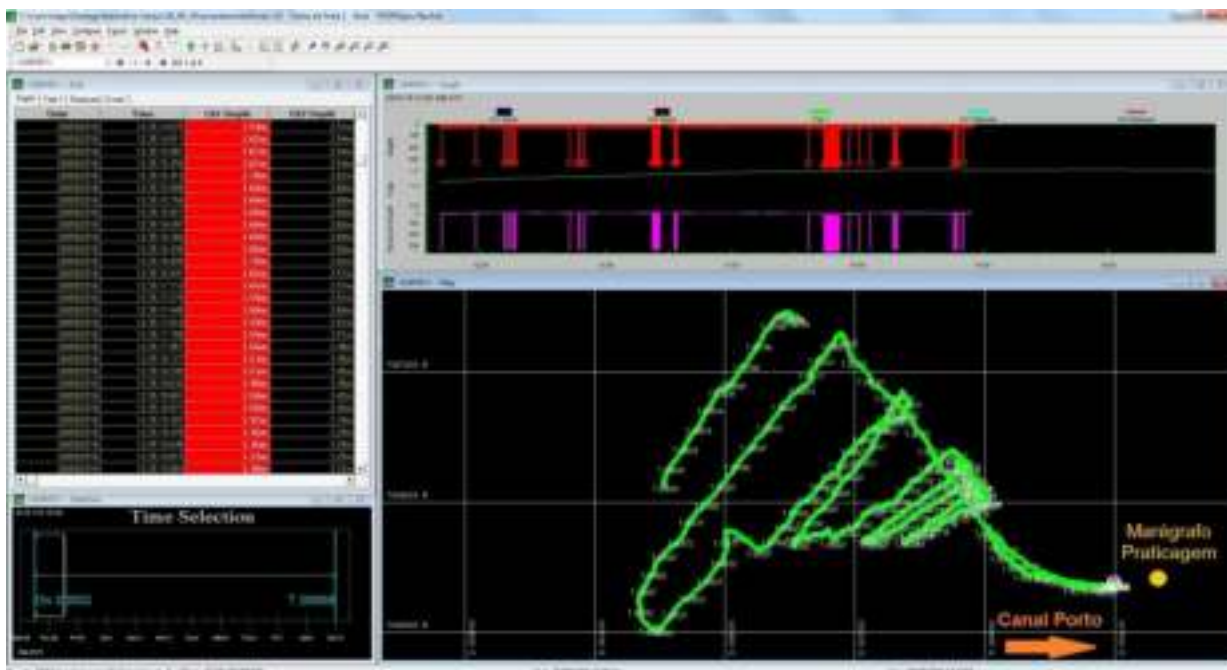


Figura 62. Captura de tela do software HYDROpro NavEdit® para processamento de dados, com indicação do marégrafo e sentido de entrada do canal de acesso ao Porto.
Fonte: elaborado pela autora.

5.1.2.3. Variação da linha de costa entre 2009 e 2017

Para compor um histórico de imagens georreferenciadas da região da Ponta da Praia, mais especificamente até o Canal 5, em períodos prévios aos levantamentos de campo, isto é, entre os anos de 2009 a 2013, utilizou-se o programa Google Earth (©2015 Google Inc.). Leatherman (2003) propôs uma metodologia para interpretações de imagens aéreas utilizando os limites de areia seca/úmida para avaliar a variação da linha de costa. Entretanto Muehe e Klumb-Oliveira (2014) apontaram inconsistências neste método, dado que o instante da foto não corresponde às condições de declividade do perfil praiial e maré associados.

Em razão disso, no presente trabalho, optou-se por uma metodologia que permitisse a obtenção de imagens georreferenciadas para posterior comparação com os dados de campo, de forma que o mesmo referencial pudesse ser utilizado. O procedimento adotado, portanto, fez uso de 3 fotografias de satélite do Google Earth, para as datas apresentadas na Tabela 4. Porém tal recurso não fornece o horário de cada imagem, apenas a data. Assim, foi necessário fazer uma estimativa do instante em que cada foto foi obtida já que, para fins de comparação da linha de

costa ao longo dos anos, é fundamental que as imagens estejam no mesmo nível de maré, tornando tal correção imprescindível.

Tabela 4. Data das imagens retiradas do Google Earth

DATA	ESTAÇÃO DO ANO
22/06/2009	Inverno
15/06/2010	Outono
02/03/2013	Verão

Fonte: elaborada pela autora.

A estimativa do horário foi feita considerando-se a variação da posição do Sol ao longo do dia, o que gera sombreamentos únicos, ou seja, a sombra de um objeto passa por certa direção apenas uma vez no dia. Tal posicionamento foi obtido por meio da ferramenta Sun Position, por SunEarthTools.com, que expõe a angulação dos raios luminosos a cada hora, conforme ilustra a Figura 63, porém a imagem de fundo exibida pelo programa não corresponde ao dia dos raios luminosos fornecidos. Assim sendo, o posicionamento das linhas de sombra foi exportado para o *software* AutoCAD Civil 3D® e sobreposto à imagem georreferenciada da data correspondente, isto é, cada imagem de satélite tem sua data e sombreamentos associados.

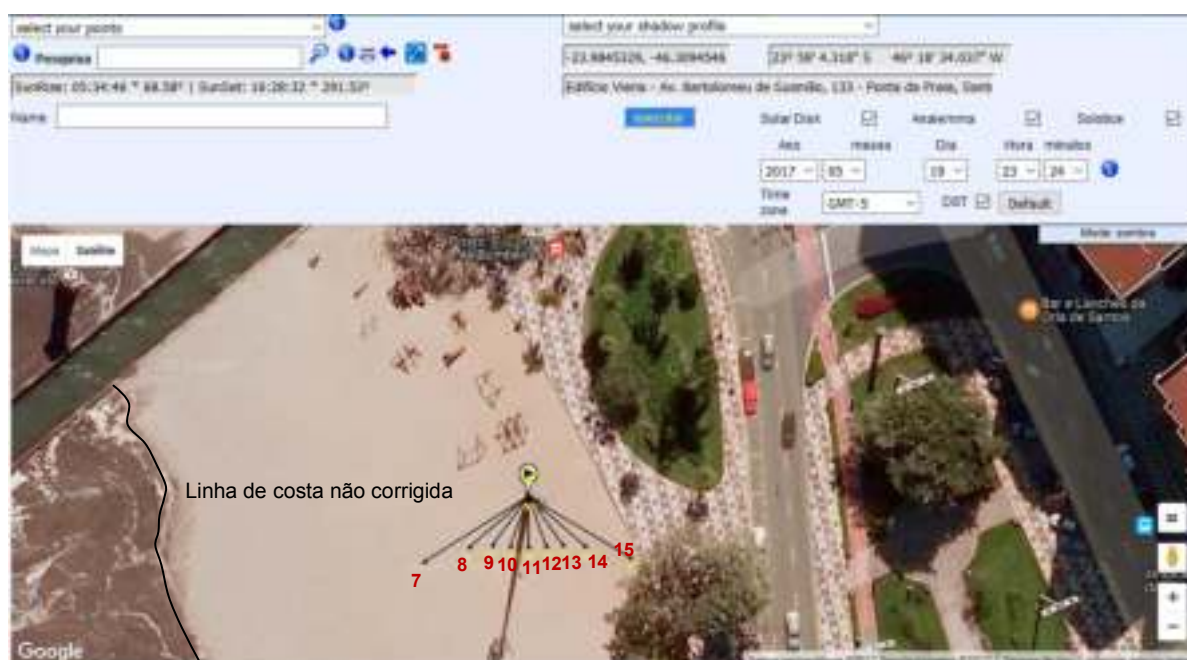


Figura 63. Captura de tela para exemplo de utilização da ferramenta Sun Position.

Fonte: adaptado de Venancio; Gireli; Garcia, 2017.

Para exemplificar, a partir da observação da sombra do poste existente na Figura 63, foi possível determinar que a imagem foi capturada às 10h30 da manhã, aproximadamente. Na sequência, na foto utilizada foi traçada uma linha de costa preliminar, isto é, sem correção do nível de maré, acompanhando a interface entre a água e areia da praia.

O traçado preliminar indica a posição da linha de costa para o nível de maré no instante da imagem. Considerando a correção necessária, a partir dos dados das tábuas de maré de Torre Grande fornecida pela Marinha e, cuja defasagem foi corrigida baseada em SONDOTÉCNICA (1977), a senóide que representa a variação do nível do mar foi traçada e obteve-se a cota do nível d'água no momento da foto utilizada. O deslocamento da linha de costa preliminar para a linha do zero, do Nível de Redução da Marinha, foi estimado por meio de um cálculo que considera a declividade da praia, que, por sua vez, foi estimada com base no primeiro levantamento de campo (maio de 2014) – isto é, trigonometricamente, uma variação de altura resulta em certo recuo no plano horizontal.

Por fim, tendo-se obtido todas as linhas de costa corrigidas do período em análise, os resultados foram divididos em dois trechos: o primeiro da região compreendida entre os Canais 5 e 6, e o segundo da região do Canal 6 à extremidade da praia. Tendo sido analisados os trechos de maior recuo, o que não necessariamente se associa aos perfis transversais de referência.

Para a validação deste método, selecionou-se outra imagem do Google Earth® com data próxima a de um levantamento de campo. Então, aplicou-se sobre ela a metodologia descrita acima e fez-se uma comparação entre o traçado de linha de costa obtido e a posição do 0 DNH do respectivo levantamento adotado.

5.1.2.4. Comparação de batimetrias e alteração do volume de controle

A comparação de batimetrias foi realizada a partir de três grupos de dados, sendo dois grupos do tipo secundário e um do tipo primário. Eles são descritos a seguir:

- Levantamento de dados pré-dragagem: INPH – 2006 – Canal de acesso ao Porto de Santos (INPH, 2007). Consiste apenas na área do Trecho 1 do canal do Porto e suas adjacências, sem considerar as praias;

- Levantamento de dados (FUNDESPA, 2014) referentes a dezembro de 2013. Consiste em um levantamento batimétrico no trecho compreendido entre o Canal 4 e o alinhamento da Fortaleza de Santo Amaro da Barra Grande, entre a zona de arrebentação e os limites do canal de acesso ao porto (cerca de 10 metros de profundidade);
- Levantamento de campo realizado em 28 de setembro de 2016. Consiste no trecho compreendido entre o Canal 5 e a Seção STOS-23, cobrindo a área das proximidades da zona de arrebentação até os limites do canal do porto.

Para cada grupo de dados, foi gerado um modelo digital de elevação (MDE) feito no *software* gráfico AutoCAD Civil 3D®, da Autodesk, conforme visto na Figura 64. O MDE gera uma superfície que representa a batimetria da região de estudo. Em seguida, foram extraídos, a partir da mesma ferramenta, os perfis que se encontram nas posições das seções STOS-23 a STOS-18, conforme ilustrado na Figura 48 do item 4.

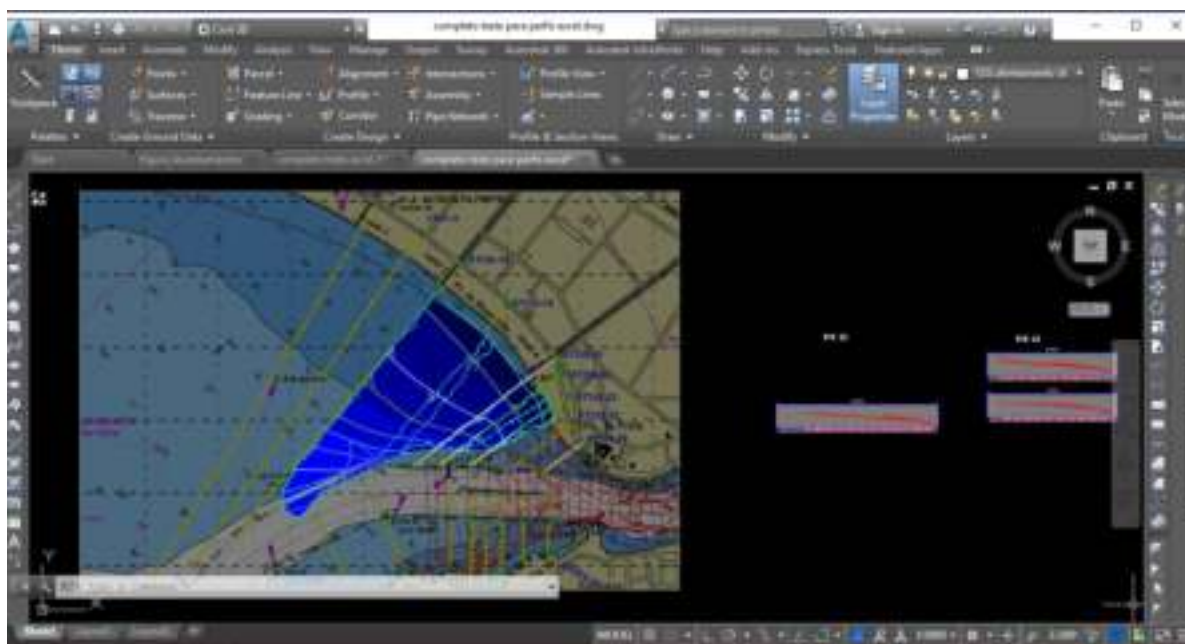


Figura 64. Captura de tela do *software* AutoCAD Civil 3D® utilizado para a geração dos MDE.
Fonte: elaborado pela autora.

A comparação dos volumes de controle, por sua vez, consistiu em duas subtrações de superfícies MDE:

- Área entre STOS-23 a STOS 21: trecho entre o Canal 6 e a extremidade da praia;
- Área entre STOS-23 e STOS-18: trecho que engloba os dados de (FUNDESPA, 2014) e os dados de campo.

Embora o *software* realize o cálculo dos volumes erodidos ou assoreados, no presente estudo, são apresentados apenas os volumes erodidos. Ademais, foram geradas figuras de variação de cotas de fundo para permitir a visualização espacial dos pontos com maior variação de cotas e, conseqüentemente, volume.

Além disso, a partir da subtração das superfícies de nível, foram elaborados mapas de variação de profundidades. Isto é, um ponto com -10 metros na batimetria, por exemplo, que foi alterado para - 7 metros na batimetria mais recente, teve uma variação de + 3 metros (assoreamento). Portanto, nestes mapas, cotas negativas indicam erosão, enquanto que as cotas positivas indicam assoreamento.

5.2. Modelagem Mike 21

Os modelos matemáticos são aproximações da realidade, principalmente quando se trata de modelos da zona costeira. Este trabalho, por sua vez, faz uso de dois módulos do *software* Mike 21®, desenvolvido e fornecido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI), com licença temporária para fins acadêmicos: o *Flow Model Flexible Mesh - Hydrodynamic Module* (*Flow Model FM-HD*) e o *Spectral Wave Module* (SW). Ambos os módulos são de característica bidimensional.

O *Flow Model FM – HD* é a ferramenta que funciona como componente básico do sistema Mike 21 Flow Model FM, e é responsável por fornecer a base hidrodinâmica para os demais módulos. Ele é baseado na solução numérica de equações de águas rasas utilizando o método de volume finito centrado na célula e no uso de malha flexível. O modelo aceita tanto coordenadas esféricas quanto cartesianas para o desenvolvimento do seu domínio horizontal (DHI, 2016a).

O módulo SW, por sua vez, trabalha com a avaliação do clima de ondas na zona *offshore* e em regiões costeiras. Ele é um modelo para espectros de ondas geradas pelo vento, no qual é possível visualizar seu crescimento, decadência e transformação. O programa utiliza o equacionamento espectral completo, fundamentado na conservação da ação das ondas e cuja variável dependente é a

frequência direcional do espectro ondulatório. Entretanto, este módulo não calcula os fenômenos de difração e reflexão (DHI, 2016c).

Nos itens a seguir são detalhadas as metodologias de calibração adotada em cada módulo, assim como a dependência existente entre eles.

5.2.1. Módulo Flow Model FM – HD

O equacionamento básico adotado pelo módulo *Flow Model FM – HD* consiste em uma equação de continuidade (Equação 1) e duas equações de momento horizontal: uma para coordenada x (Equação 2) e uma para coordenada y (Equação 3). O módulo bidimensional adota velocidades médias em profundidade U e V , e executa um esquema explícito para a integração do tempo (DHI, 2016b).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hU}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fVh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hV}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fUh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

nas quais t é o tempo; x e y são as coordenadas cartesianas; η é a elevação da superfície; d é a profundidade da água em repouso; $h = \eta + d$ é a profundidade total; U e V são as componentes de velocidade nas direções x e y ; $f = 2\Omega \sin\phi$ é o parâmetro de Coriolis (Ω é a taxa angular de evolução e ϕ é a latitude geográfica); g é a aceleração da gravidade; ρ é a densidade da água; S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} são componentes do tensor de tensão de radiação; v_t é a viscosidade turbulenta na

direção vertical; ρ_0 é a densidade de referência da água. S é a magnitude da descarga devido a fontes pontuais e (u_s, v_s) é a velocidade com a qual a água é despejada na água ambiente. As tensões T_{ij} laterais incluem o atrito viscoso, atrito turbulento e advecção diferencial. Elas são estimadas usando uma formulação de viscosidade vertical turbulenta, baseada nos gradientes de velocidades integradas na vertical (DHI, 2016b):

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial U}{\partial x}; T_{xy} = A \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right); T_{yy} = 2A \frac{\partial V}{\partial x} \quad (4)$$

A batimetria inicial, por sua vez, foi desenvolvida a partir de um mosaico de informações contendo cartas náuticas, folhas de bordo e outros levantamentos (dados secundários), especificados a seguir:

- Dados batimétricos DHN:
 - FB – 1700-005/82 – De ‘Ilha da Moela’ a ‘Ilha Montão de Trigo’ – escala 1:100000 (GARCIA et al., 2002);
- Cartas náuticas:
 - Carta nº. 1701 (Detalhe de São Vicente) – escala 1:23000 (MARMIL, 2015);
 - Carta nº. 1711 (Adjacências do Porto de Santos) – escala 1:80000 (MARMIL, 2015);
- Fontes hidrográficas:
 - CTH – 1976 – Estuário e Baía de São Vicente – escala 1:2000 (GARCIA et al., 2002);
 - INPH – 2006 – Canal de acesso ao Porto de Santos – escala 1:5000 (INPH, 2007);
 - Mangue (estimativa) – Planícies de inundação e partes do canal de Bertoga foram estimados utilizando interpolação de fontes hidrográficas e imagens do Google Earth (SOUZA, 2017).

A partir dessa batimetria, foram determinados três cenários para posterior análise:

- **Cenário 1:** cenário base com a batimetria original utilizada por Correa, Souza e Gireli (2016), anterior ao início das atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto;

- **Cenário 2:** atualização do canal do porto para a situação de pós-dragagem de aprofundamento e alargamento. Para isto, foi realizada a substituição da batimetria do canal, utilizando dados batimétricos levantados e fornecidos pela CODESP referentes ao ano de 2014;
- **Cenário 3:** cenário 2 com a substituição da batimetria do trecho compreendido entre os limites do canal de acesso e a calçada da orla, com os detalhes descritos a seguir:
 - Perfis batimétricos no trecho entre os Canais 4 e 5 pelas informações coletadas por (FUNDESPA, 2014);
 - Perfis batimétricos no trecho entre o canal 5 e a ponta da praia pelos dados coletados em campo em 28 de setembro de 2016;
 - Perfis topográficos no trecho entre o Canal 4 e a ponta da praia pelos dados coletados no levantamento realizado em 15 de setembro de 2016.

É importante frisar que a configuração utilizada neste módulo foi calibrada e adaptada por Correa, Souza e Gireli (2016), a partir do modelo desenvolvido por Souza (2012). As forçantes adotadas foram marés, vazões fluviais mais importantes e ventos.

Como a área de interesse original incluía toda a representação do estuário (Figura 65), o modelo foi calibrado considerando este objetivo. Entretanto, para o presente estudo, foi necessária a discretização da área costeira, principalmente da região compreendida entre o Canal 5 e a Ponta da Praia. Como qualquer densificação das informações compromete o tempo de processamento de cada simulação, foi proposto, assim, um recorte da área inicial. Primeiramente fez-se uma simulação para a área original, para a qual o modelo foi calibrado e, em seguida, utilizou-se as saídas destas simulações como dados de entrada para o modelo do recorte (Figura 66) Esse procedimento também é conhecido como aninhamento de malha.

Desta forma, as simulações foram realizadas em duas fases:

- (i) A primeira com o modelo completo, incluindo o estuário, a partir de Souza (2012) e Correa, Souza e Gireli (2016);
- (ii) A segunda com o modelo refinado, incluindo apenas a Baía de Santos e adjacências. Os dados de entrada foram obtidos do modelo

completo (item i) e com densidade de pontos maior na região da Ponta da Praia.

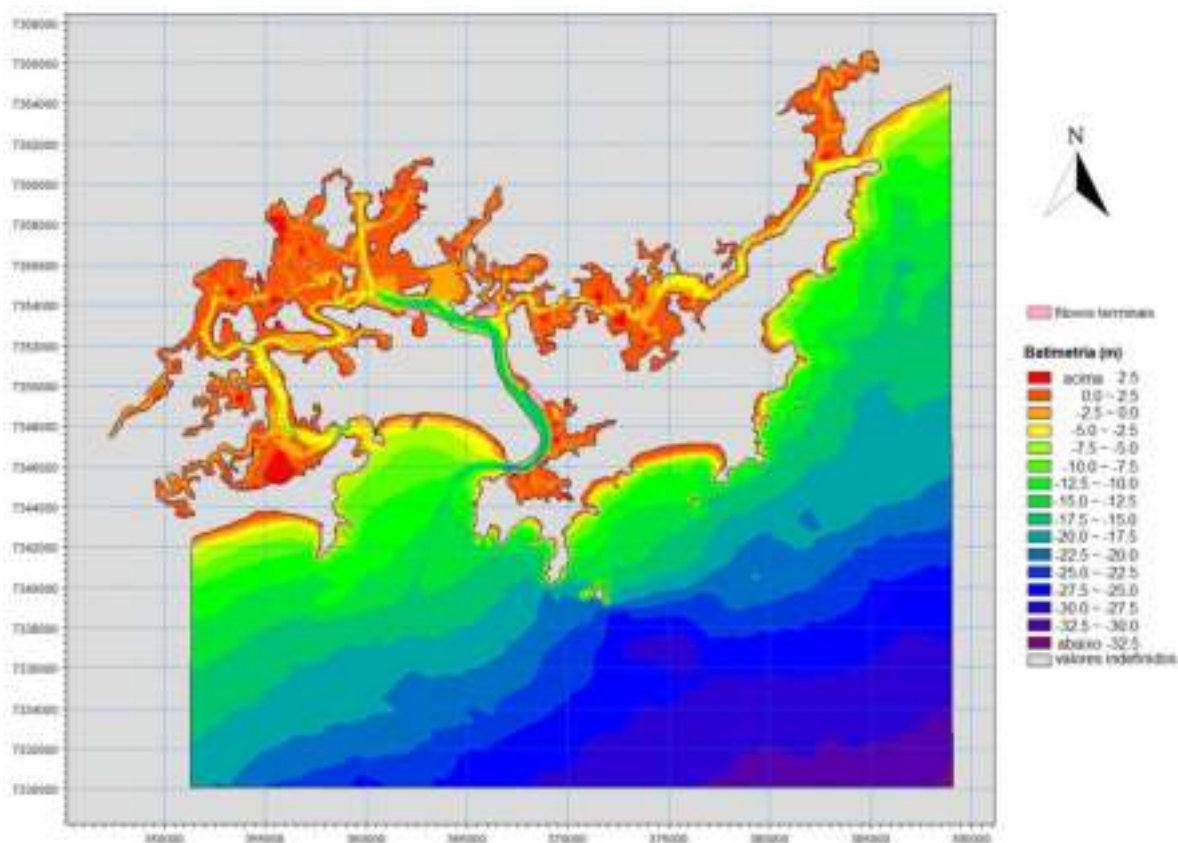


Figura 65. Batimetria original.
Fonte: adaptado de Correa; Souza; Gireli, 2016.

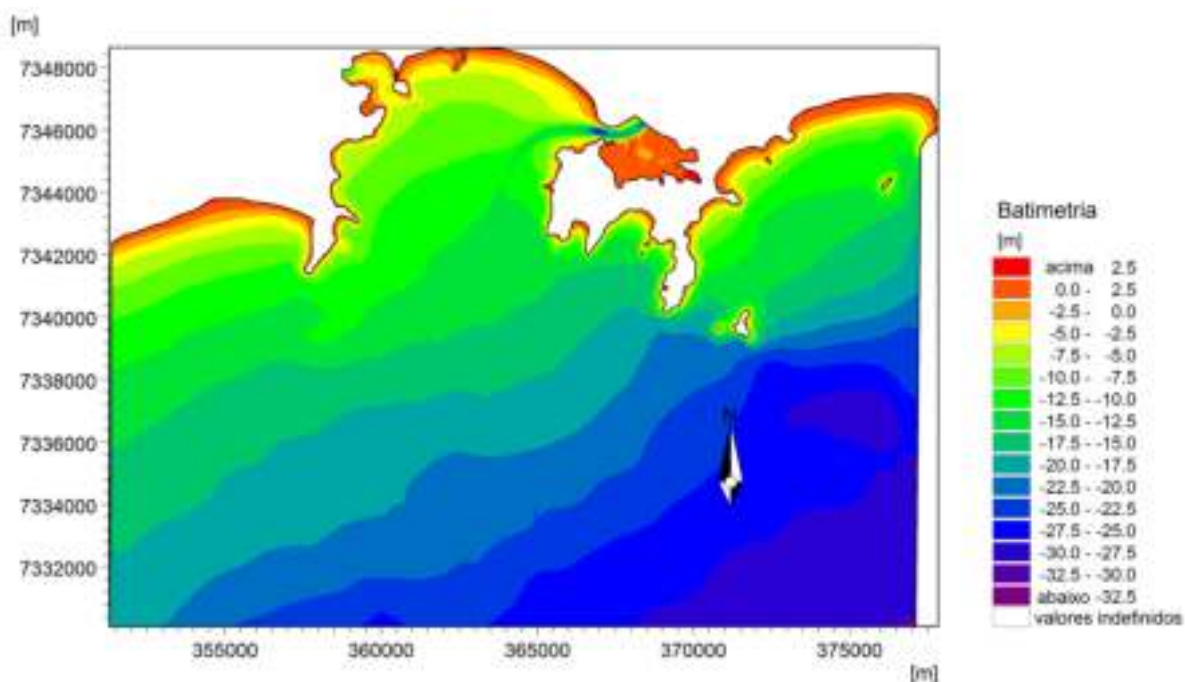


Figura 66. Recorte do modelo original utilizado na segunda etapa de simulação.
Fonte: elaborado pela autora.

As bordas recortadas, com suas coordenadas especificadas na Tabela 5, foram:

- SE-1: seção na entrada do estuário pelo lado de Santos;
- Seção São Vicente: seção na entrada do estuário pelo lado de São Vicente;
- Seção Guarujá: borda leste do modelo;
- Enquanto as bordas sul e oeste permaneceram as mesmas.

Tabela 5. Coordenadas do recorte realizado no modelo original.

SEÇÃO	Ponto 1	Ponto 2	Número de pontos	Comprimento aproximado (m)
SE-1	368.134,957	368.629,560	30	637 m
	7.346.460,215	7.346.059,849		
São Vicente	358.774,244	358.770,150	10	295 m
	7.347.642,088	7.347.935,901		
Guarujá	377.271,198	377.113,027	100	15.000 m
	7.345.258,264	7.330.092,352		

Fonte: elaborada pela autora.

As simulações foram realizadas considerando a data de 21 de agosto de 2006, pois há dados de ventos e ondas em FUNDESPA (2013b) (dia de ressaca, no qual foram constatadas maiores intensidades de ondas e ventos), conforme Tabela 6, com ondógrafo posicionado nas seguintes coordenadas (WGS – 84):

- 24°00'21.51" SUL
- 46°20'21.77" OESTE

Tabela 6. Dados de onda e vento considerados nas simulações.

Evento	Dado de Ondas				Dado de Vento		
	Data	Hs (m)	T (s)	Direção	Ângulo (°)	n° evento	V (m/s)
21/08/2006	3.52	11	Sul	180	51	5	230

Fonte: elaborada pela autora, retirado de FUNDESPA (2013b).

5.2.2. Módulo SW

As dinâmicas das ondas de gravidade são descritas pela equação de transporte para densidade de agitação da onda. O espectro de densidade de agitação da onda varia no tempo e no espaço e é uma função de dois parâmetros de fase da onda. Tais parâmetros podem ser o vetor do número de onda \vec{k} , de magnitude k e direção θ ; ou, alternativamente, podem ser a direção da onda θ e a frequência angular (intrínseca) relativa, dada como $\sigma = 2\pi f_r$, ou a frequência angular absoluta, dada como $\omega = 2\pi f_a$. Este módulo adotou a formulação em função da direção da onda e da frequência angular relativa. A densidade de agitação, $N(\sigma, \theta)$, está relacionada à densidade de energia $E(\sigma, \theta)$ dada pela Equação 5 (DHI, 2016d).

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (5)$$

Para a propagação de onda em condições de variação lenta de profundidade e correntes, a relação entre a frequência angular relativa e a frequência angular absoluta é dada por uma relação de dispersão linear, Equação 6.

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (6)$$

na qual g é a aceleração da gravidade, d é a profundidade da água e \vec{U} é o vetor da velocidade de corrente. A magnitude da celeridade de grupo c_g da energia de onda com relação à corrente é dada pela Equação 7.

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} \quad (7)$$

A celeridade de fase, c , da onda relativa à corrente é dada pela Equação 8.

$$c = \frac{\sigma}{k} \quad (8)$$

A frequência do espectro é limitada pelo alcance entre a frequência mínima, σ_{min} , e a frequência máxima, σ_{max} . A parte determinística do espectro é determinada pela resolução da equação de transporte para a densidade de agitação da onda utilizando métodos numéricos. Acima do limite de frequência de corte da região de prognóstico, um caudal paramétrico é aplicado, Equação 9.

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{max}, \theta) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^{-m} \quad (9)$$

na qual m é uma constante. No presente modelo, é aplicado $m = 5$. A máxima frequência de prognóstico é determinada conforme Equação 10.

$$\sigma_{cut-off} = \min[\sigma_{max}, \max(2.5\bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \quad (10)$$

na qual σ_{max} é máxima frequência discreta usada no modelo de onda determinístico, $\bar{\sigma}$ é a frequência média relativa e $\sigma_{PM} = \frac{g}{28u_{10}}$ é a frequência de pico de Pierson-Moskowitz para ondas totalmente desenvolvidas (U_{10} é a velocidade do vento a 10 metros acima do nível médio do mar). O diagnóstico caudal é utilizado nos cálculos de transferência não linear e no cálculo dos parâmetros integrais utilizados na função de origem. Abaixo da frequência mínima, o espectro de densidades é assumido como zero.

Como padrão, a frequência média, utilizada na Equação 10, é calculada baseada no espectro completo (DHI, 2016d).

Os parâmetros de entrada principais utilizados no módulo SW, ilustrados na Figura 67, foram:

- Formulação espectral completa;
- Condições de nível d'água extraídas do módulo *Flow Model FM – HD* (apenas nas simulações com correntes);
- Ventos

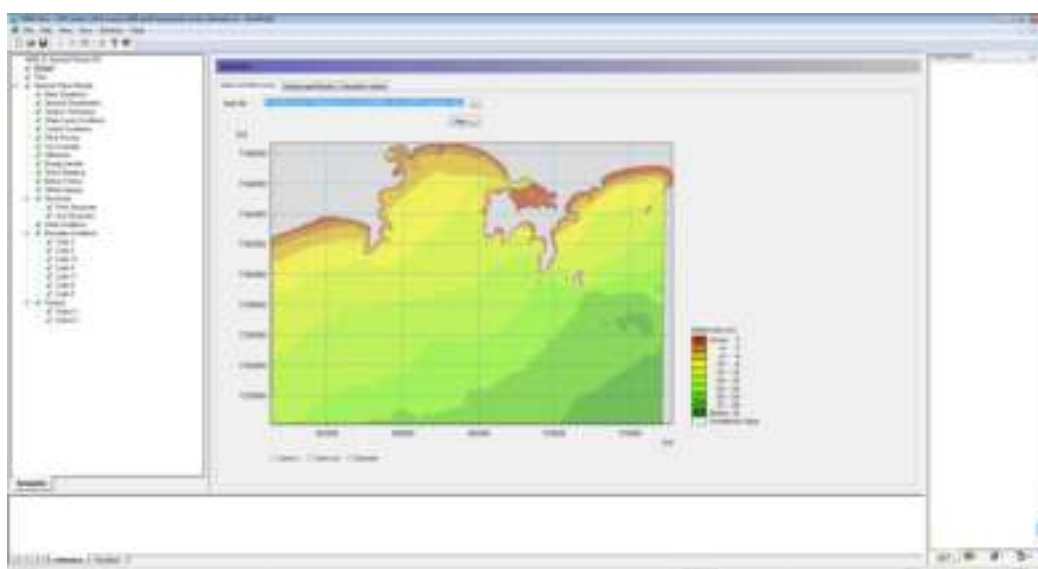


Figura 67. Captura de tela de setup do módulo SW.
Fonte: elaborada pela autora.

As simulações realizadas neste módulo, por sua vez, consideraram os mesmos cenários, dado de onda e data do item 5.6.1. E consideraram o efeito combinado de ondas e correntes, adotando as saídas do Flow Model FM - HD como dado de entrada.

Uma informação importante a respeito do processo de calibração deste módulo é com relação à onda de projeto. O dado de onda utilizado foi medido no meio da baía de Santos (ondógrafo operado por FUDESPA, 2013b) e este modelo permite apenas a inserção destas informações nas bordas, isto é, distante do ponto de medição. Para que isso fosse possível, foram arbitradas ondas nas bordas marítimas do modelo e propagadas pelo interior da baía até que se obtivesse, no ponto de instalação do ondógrafo, um trem de ondas que correspondesse ao dado medido, conforme Tabela 6 do item 5.6.1. Cabe ressaltar que a batimetria

empregada foi a do Cenário 1, uma vez que o evento simulado ocorreu no ano de 2006. Para os demais cenários, foi inserida na borda a onda calibrada pelo processo supracitado.

Para a análise dos resultados, foram extraídas das simulações realizadas para os três cenários as seguintes informações:

- (i) Saídas gráficas de intensidade e direção de correntes do *Flow Model FM-HD*
- (ii) Altura significativa e direção de onda para o *SW*.

Os instantes de maré considerados estão listados na Tabela 7, os *time steps* identificados serão analisados posteriormente. Escolheram-se os instantes de meia-maré por apresentarem maiores velocidades, e o instante de uma hora antes da baixa-mar para tentar verificar a corrente em direção ao canal do Porto que foi notada durante os levantamentos de campo.

Tabela 7. Instantes de maré e *time steps* dos quais foram extraídas saídas de resultados.

INSTANTE DE MARÉ	TIME STEP <i>Flow Model FM-HD</i>	DATA	TIME STEP <i>SW</i>
Meia Maré Vazante		21/08/2006 07:39	46
Baixa-mar		21/08/2006 11:00	66
Meia Maré Enchente	517	21/08/2006 14:08	85
Preamar		21/08/2006 17:30	105
Meia Maré Vazante	552	21/08/2006 19:58	
1 Hora Antes da Baixa-mar	564	21/08/2006 22:00	

Fonte: elaborada pela autora.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Dados de campo

Os dados de campo obtidos conforme procedimentos descritos no item 5.1.1 foram processados conforme item 5.1.2 para obter duas análises: uma da variação da linha de costa no período compreendido entre 2009 e 2017, discutida no item 6.1.1, e uma da comparação de batimetrias e volume de controle, discutida no item 6.1.2.

6.1.1. Variação da linha de costa entre 2009 e 2017

Antes da discussão dos resultados obtidos pelo método descrito no item 5.1.2.3, apresenta-se, primeiramente, a sua validação. Para tal procedimento foram necessárias as seguintes informações:

- (i) Dados do levantamento de campo do dia 15/09/2016 e seu respectivo MDE já referenciado no Nível de Redução da Marinha (0 DHN);
- (ii) Imagem capturada por meio da ferramenta Google Earth® na data mais próxima ao levantamento de campo, no caso 28/09/2016;
- (iii) Padrão de sombreamento para a data da imagem do Google Earth® obtida pela ferramenta Sun Position;
- (iv) Tábua de marés, do marégrafo de Torre Grande em Santos, também para a mesma data;
- (v) Declividade média da praia estimada a partir de um levantamento de referência, isto é, levantamento do dia 08/05/2014.

Primeiramente, a imagem obtida do Google Earth foi georreferenciada no arquivo do MDE do levantamento por meio do AutoCAD Civil 3D®, conforme apresentado na Figura 68. Em seguida sobrepôs-se a essa imagem o padrão de sombreamento obtido pela ferramenta Sun Position, empregando um poste de iluminação da praia como ponto de referência, de forma a estimar o horário da foto por meio do recurso de transparência de imagem, segundo Figura 69.

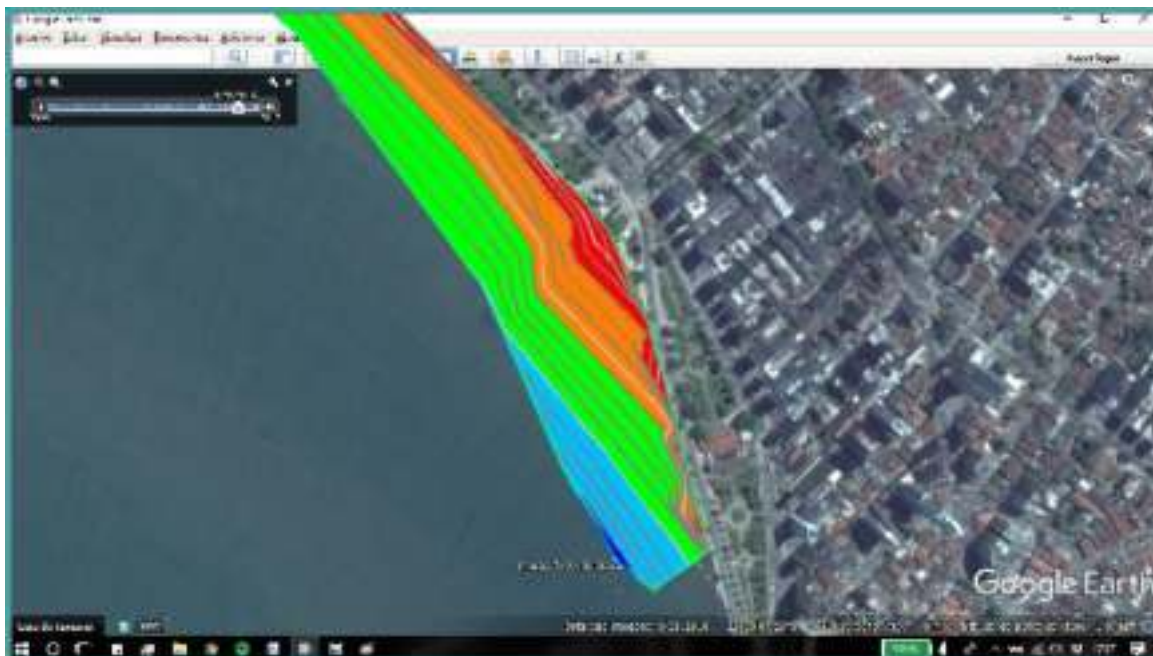


Figura 68. Georreferenciamento da imagem obtida pelo Google Earth® para o dia 28/09/2016 no MDE do levantamento de campo de 15/09/2016.



Figura 69. Sobreposição do padrão de sombreamento do programa Sun Position à imagem georreferenciada do Google Earth®

Ao analisar a sombra do poste juntamente ao padrão de sombreamento, portanto, foi possível estimar que o horário da foto era, aproximadamente, 10:40 da manhã. A seguir, utilizando uma planilha Excel®, a partir dos instantes de preamar e baixa-mar fornecidos pela tábua de marés, foi gerada uma curva de variação de maré para o ponto do marégrafo de Torre Grande, ilustrada na Figura 70.

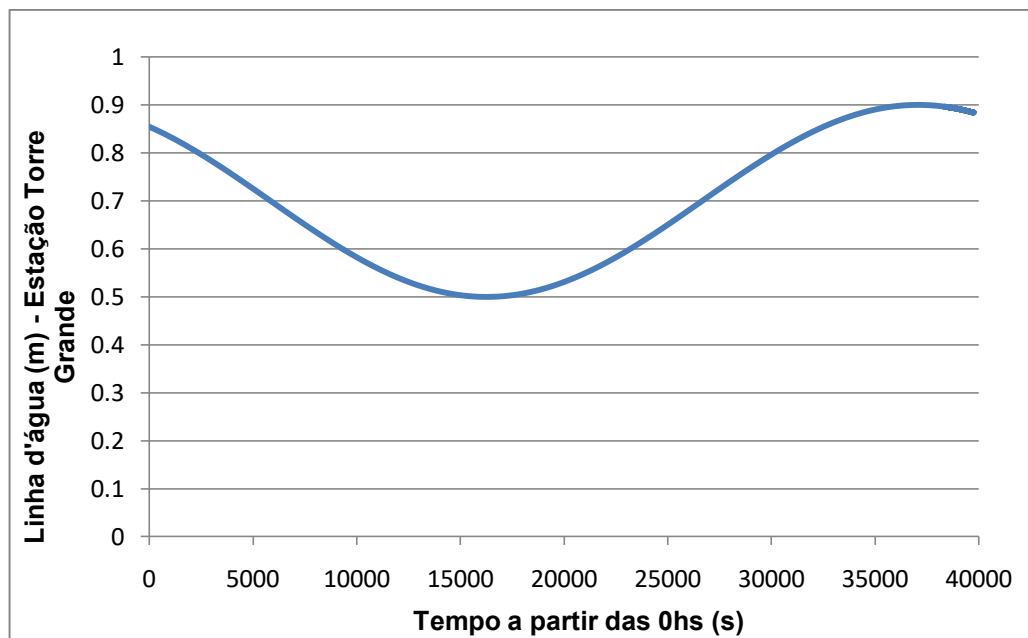


Figura 70. Curva de variação de maré para o marégrafo de Torre Grande, no dia 28/09/2016.

Segundo SONDOTÉCNICA (1977), há uma defasagem de 10 minutos entre o instante em que a onda de maré passa pela extremidade da praia e o momento em que ela atinge a posição do marégrafo. Logo, levando em conta essa diferença, foi estimada que a cota da linha d'água no instante da imagem era de + 0,859 metros.

A declividade-base da praia, que é a declividade utilizada para todas as comparações, foi obtida por meio do levantamento de 08/05/2014. E, para o trecho do Canal 6 à extremidade da praia, resultou em 2,234%, correspondendo a um deslocamento horizontal da posição da linha de costa de 38,44 metros em relação a 0 DHN. Retomando a imagem georreferenciada, traçou-se a posição da linha d'água entre o Canal 6 e a extremidade da praia e, posteriormente, trasladou-a conforme o deslocamento horizontal obtido, ilustrado na Figura 71, na qual o traçado superior corresponde à linha não corrigida e o traçado inferior à linha na posição de 0 DHN.

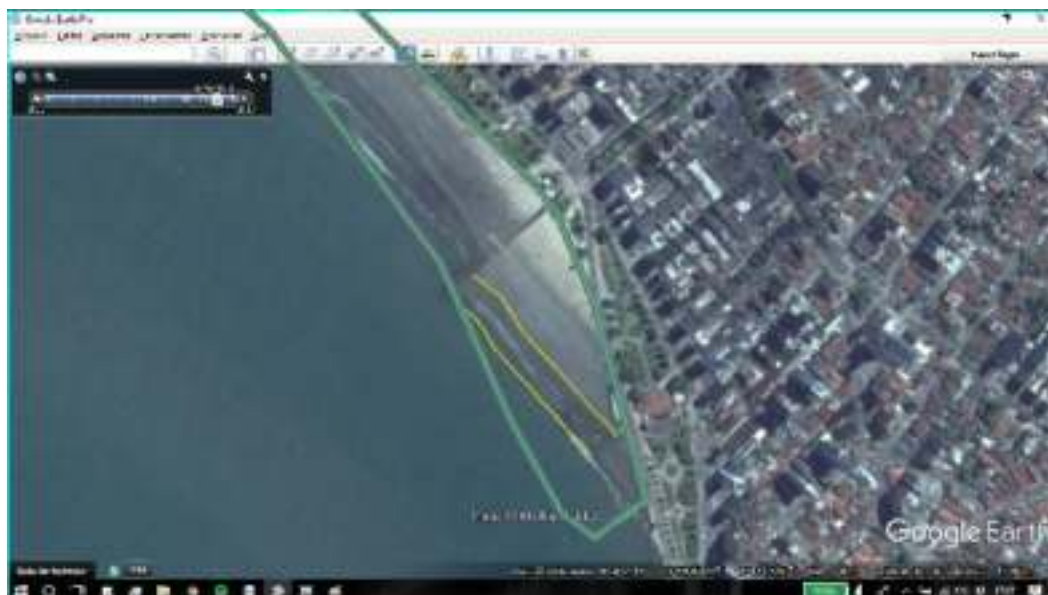


Figura 71. Traçado das linhas de costa não corrigida (à direita) e corrigida para 0 DHN (à esquerda).

Por fim, a linha corrigida para a referência 0 DHN foi comparada à isóbata 0 DHN obtida por meio da superfície referente ao levantamento de campo, destacada na interface entre as cores verde e azul da Figura 72. Pode-se concluir, então, que a metodologia adotada é válida, já que tanto a linha de costa do levantamento, quanto a linha de costa obtida na imagem do Google Earth® coincidem.



Figura 72. Sobreposição da linha de costa corrigida da imagem do Google Earth® ao MDE do levantamento de campo

Partindo agora para a apresentação dos resultados, assim como descrito no item 5.1.2.3, foram reconstituídas e corrigidas 3 imagens do Google Earth® para o

período prévio aos levantamentos de campo, com as datas estabelecidas na Tabela 4. As demais linhas de costa foram traçadas conforme dados obtidos em campo. Na Tabela 8 são apresentadas as datas, os tipos de dado e a presença ou não de eventos de ressaca em dias próximos, fator este que pode interferir na análise dos resultados.

Tabela 8. Datas, tipos de dados e incidência de ressacas para as linhas de costa a serem analisadas.

DATA	TIPO DE DADO	INCIDÊNCIA DE RESSACA
22/06/2009	Reconstituído do Google Earth	03/06/2009
15/06/2010	Reconstituído do Google Earth	09/05/2010 e 13/07/2010
02/03/2013	Reconstituído do Google Earth	sem ressacas em datas próximas
08/05/2014	Dado de campo	sem ressacas em datas próximas
03/10/2014	Dado de campo	sem ressacas em datas próximas
06/02/2015	Dado de campo	sem ressacas em datas próximas
09/05/2015	Dado de campo	20/04/2015 e 19/06/2015
15/09/2016	Dado de campo	15/09/2016
23/03/2017	Dado de campo	sem ressacas em datas próximas

Segundo os resultados do levantamento de campo de 08 de maio de 2014, isto é, o levantamento de referência, obtiveram-se as declividades-base de 0,0181 m/m para a região entre os Canais 5 e 6, e de 0,0223 m/m para o trecho entre o Canal 6 e a extremidade da praia. Tendo em mãos tais informações, foi possível realizar o traçado das linhas de costa corrigidas para as 3 imagens do Google Earth®, conforme Figura 73 e Figura 74, respectivamente.

Em ambas as figuras, a variação da posição da linha de costa é evidente, o que pode ser atribuído ao equilíbrio dinâmico das praias, bem como à variabilidade do clima de ondas. Tal deslocamento caracteriza os perfis de bom tempo, quando apresenta aspecto de engorda e traçado mais retilíneo, ou perfis de mau tempo, quando se vê um aspecto de erosão e traçado mais embaiado. Nos detalhes de 1 a 5 das Figura 73 e Figura 74 (detalhes que por sua vez estão apresentados em uma série de figuras independentes, que vão da Figura 75 à Figura 79), os caminhamentos da linha do zero do Nível de Redução da Marinha (0 DHN) foram destacados, determinando quanto ela avançou ou recuou em cada intervalo de tempo, segundo a tabela anexa de cada detalhe.

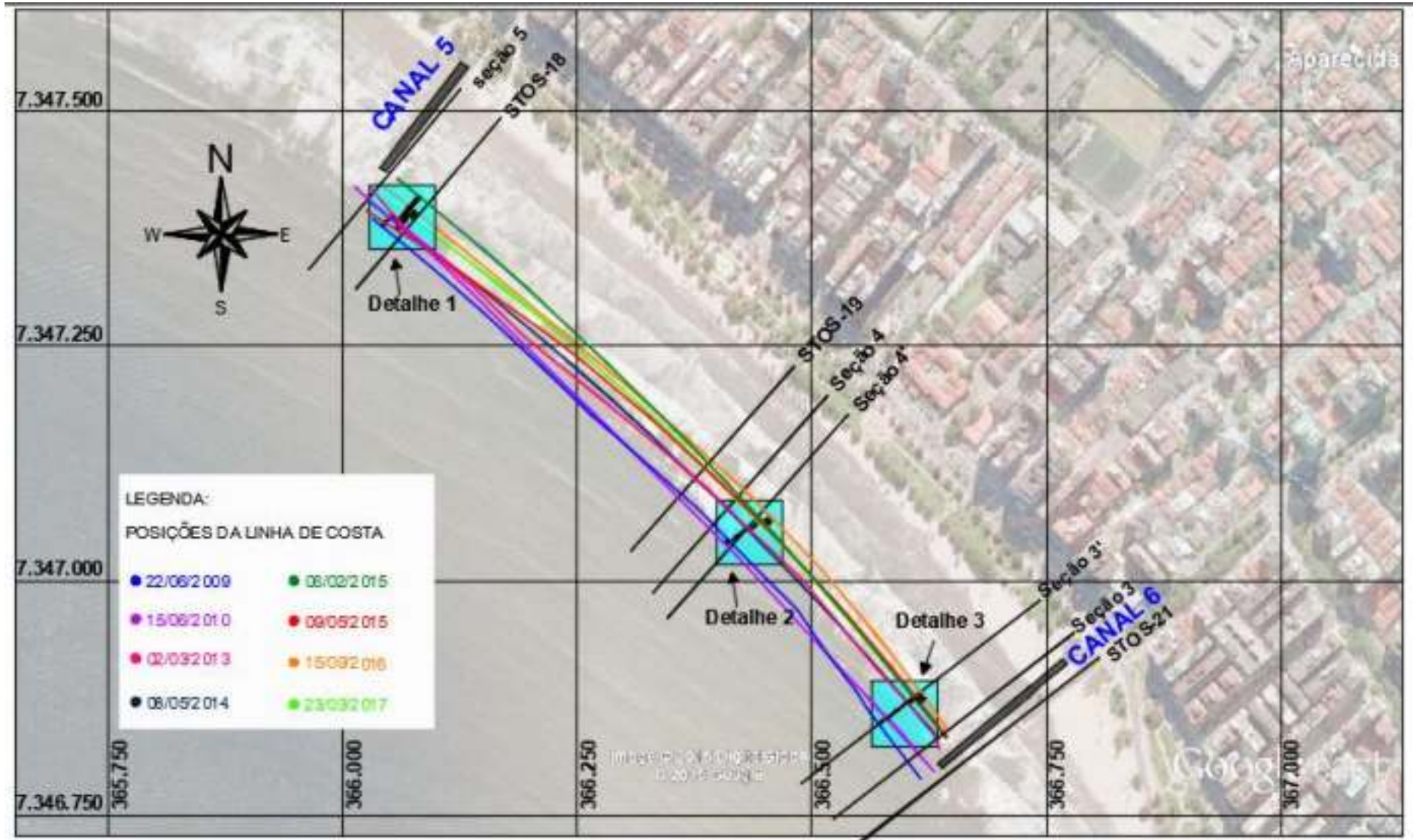


Figura 73. Posições da linha de costa na região entre os Canais 5 e 6.

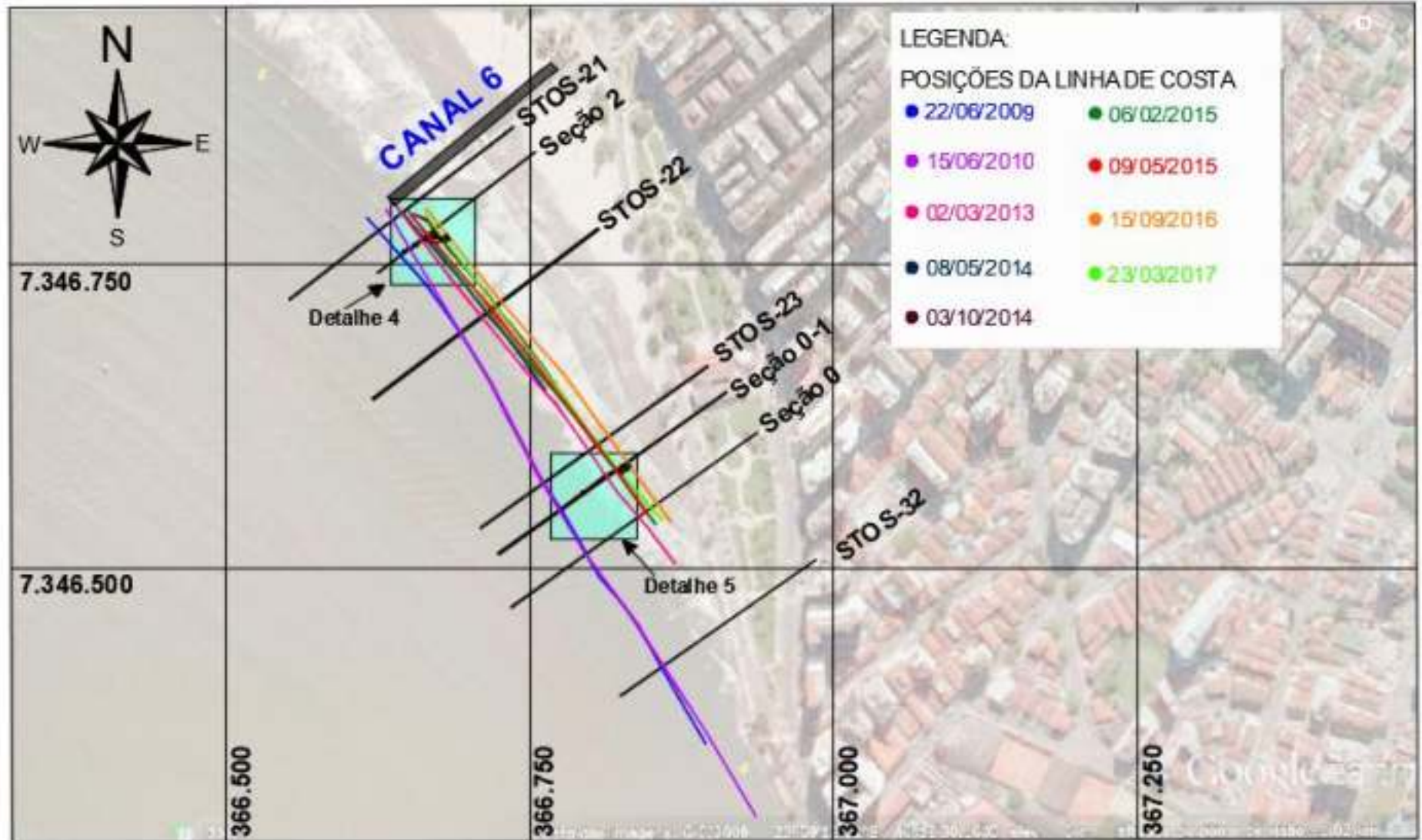


Figura 74. Posições da linha de costa na região entre o Canal 6 e a extremidade da praia.

Na Tabela 9, são apresentadas as identificações de cada linha de costa das Figura 73 e Figura 74, para um melhor entendimento dos detalhes de 1 a 5.

Tabela 9. Identificação das linhas de costa de acordo com sua respectiva data.

DATA	IDENTIFICAÇÃO DA LINHA DE COSTA
22/06/2009	LC 1
15/06/2010	LC 2
02/03/2013	LC 3
08/05/2014	LC 4
03/10/2014	LC 5
06/02/2015	LC 6
09/05/2015	LC 7
15/09/2016	LC 8
23/03/2017	LC 9

Adotando a convenção de sinais de que variações negativas se referem ao recuo da linha de costa (erosão), e variações positivas se referem ao avanço da mesma (progradação), são apresentados a seguir os detalhes das Figura 73 e Figura 74.

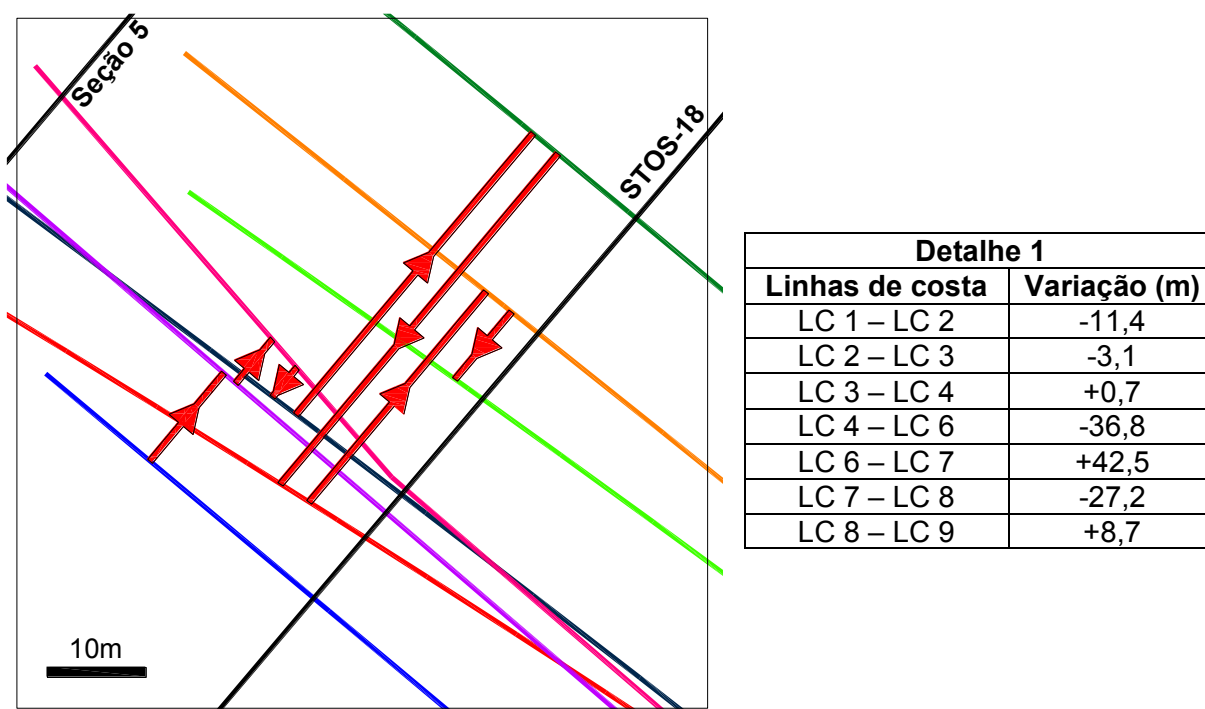


Figura 75. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 1 da Figura 73, resultando em um recuo total de 26,6 metros para o perfil STOS-18.

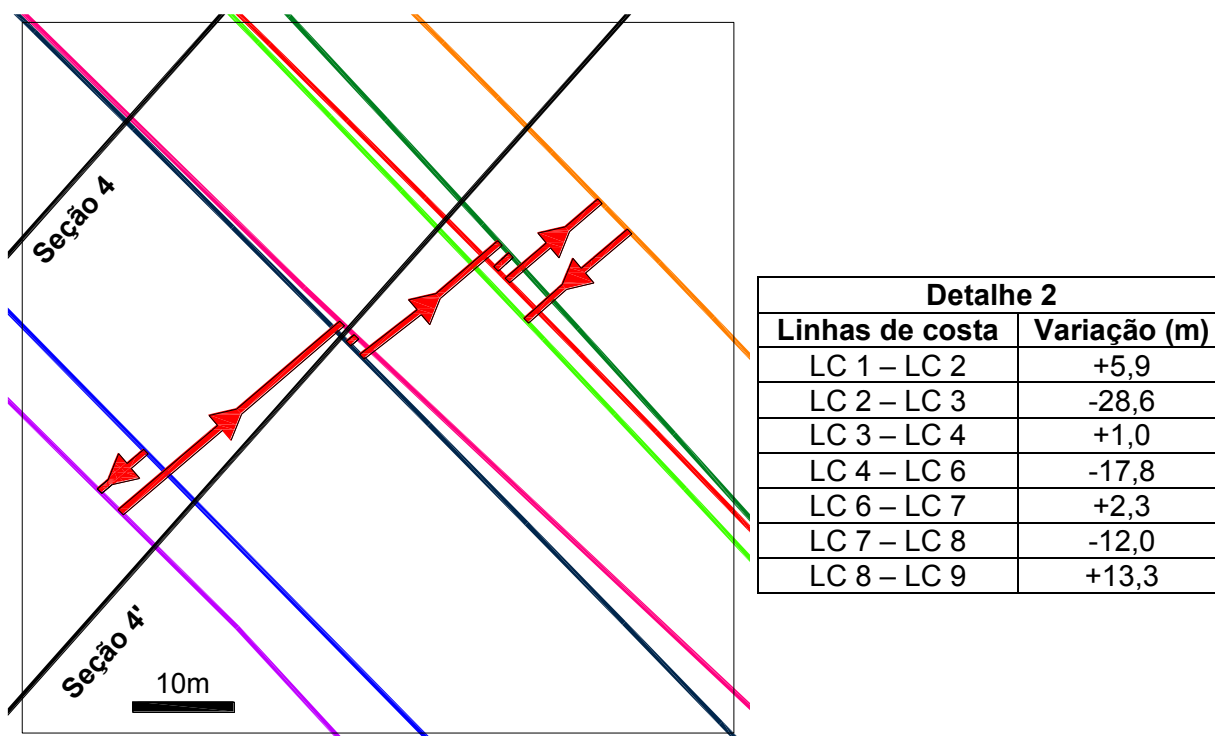


Figura 76. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 2 da Figura 73, resultando em um recuo total de 35,9 metros para a seção 4'.

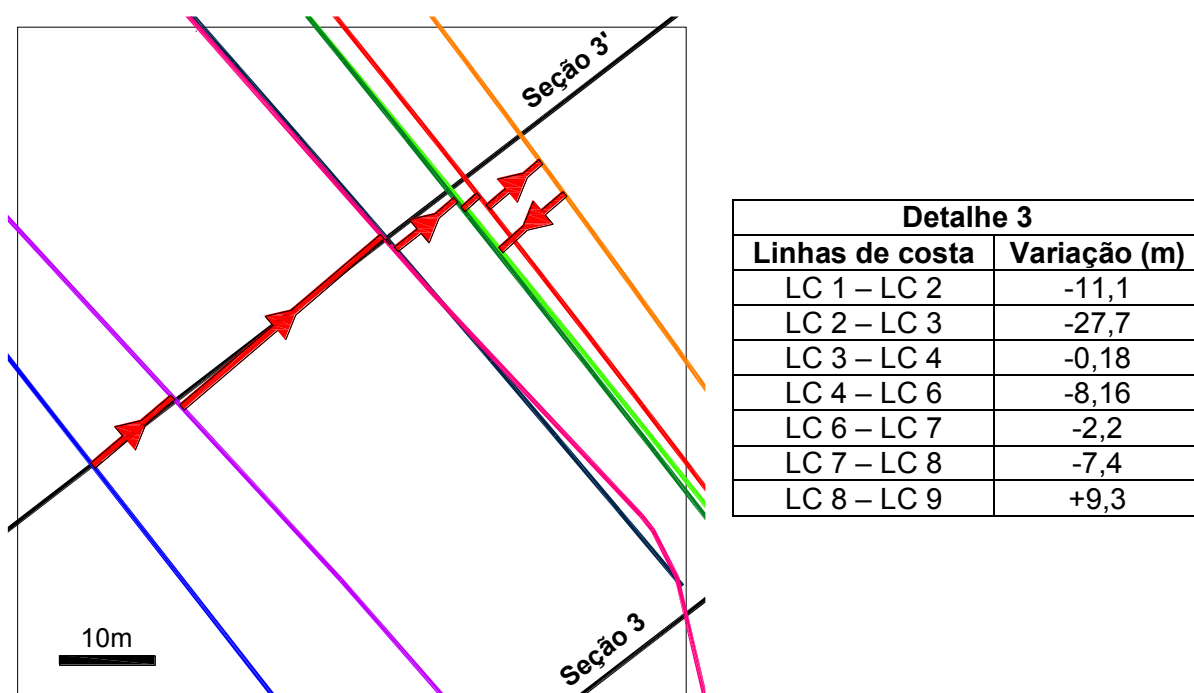


Figura 77. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 3 da Figura 73, resultando em um recuo total de 47,44 metros para a seção 3'.

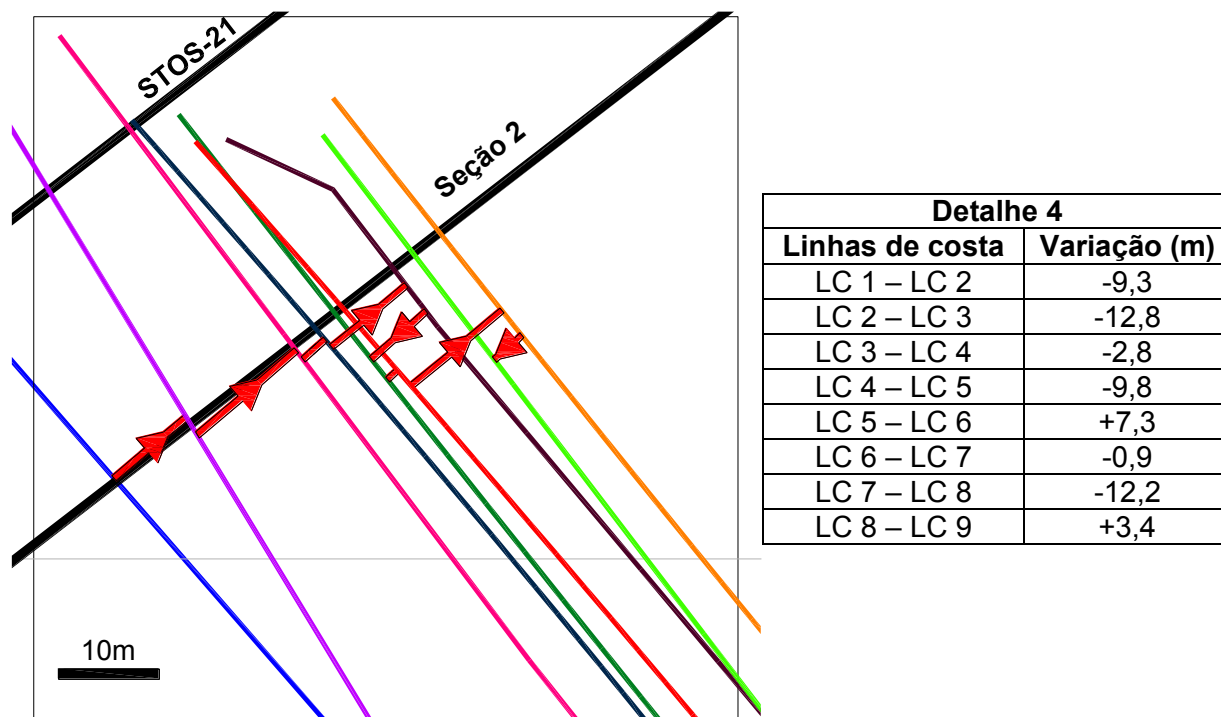


Figura 78. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 4 da Figura 74, resultando em um recuo total de 37,1 metros para a seção 2.

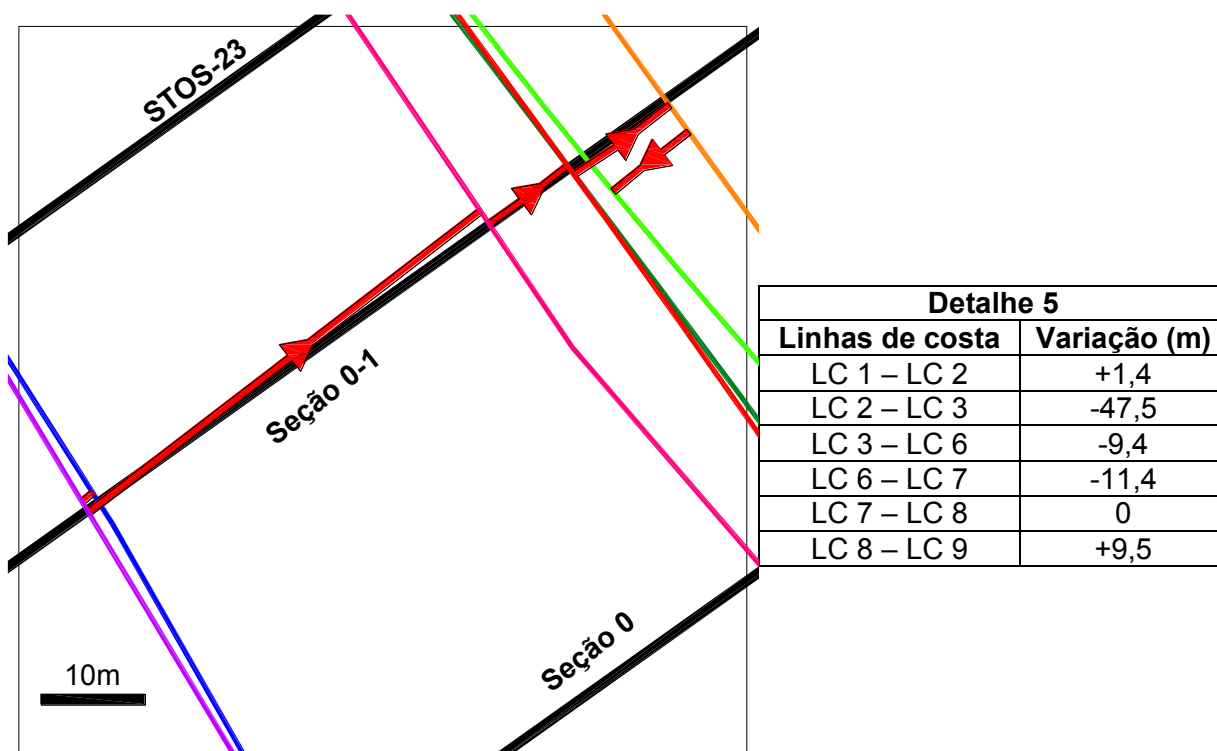


Figura 79. Caminhamento da 0 DHN para o Detalhe 5 da Figura 74, resultando em um recuo total de 57,4 metros para a seção 0-1.

Para a Figura 73, têm-se os recuos de 26,6 metros a leste do Canal 5 (detalhe 1), 35,9 metros para o trecho entre os canais 5 e 6 (detalhe 2) e 47,44 metros a oeste do Canal 6 (detalhe 3). Já para a Figura 74, obtiveram-se os recuos de 37,1

metros (detalhe 4) a leste do Canal 6 e 57,4 metros na extremidade da praia (detalhe 5).

É possível perceber que as variações da linha de costa são menores nos pontos próximos das estruturas dos canais de águas pluviais, o que indica a atuação dos mesmos como espigões, pois aprisionam parte dos sedimentos. Tal comportamento resulta em uma leve proteção ao comprimento transversal da praia. Ademais, seguindo o traçado na Figura 73 referente ao levantamento de setembro de 2016 (mau tempo devido à incidência de ressaca), pode-se perceber que o embaçamento não é simétrico: ele apresenta maior curvatura na parte leste do trecho e é mais retilíneo na parte oeste.

Essa configuração espacial da linha de costa é um indicativo de que o sentido preferencial do transporte longitudinal de sedimentos e das ondas é da Ponta da Praia rumo a oeste (em direção ao enraizamento do Emissário Submarino). Outro aspecto que pode ser apontado para corroborar essa afirmação é a assimetria no traçado da linha de costa entre os lados do Canal 6.

Já para a Figura 74 não ocorre o aprisionamento de sedimentos causado pela interferência dos canais de drenagem, pois essas obras estão presentes apenas na parte oeste do trecho. Dessa forma, a extremidade leste da praia é menos resistente à incidência das ondas, assim como às correntes longitudinais. Ao combinar a ação das ondas e das correntes, tem-se como resultado um trecho de praia rotacionado, que tem sua linha de costa migrando de uma posição sul/sudeste para uma posição estritamente sudeste, além de contar com o maior recuo da faixa de areia (comparação entre os anos de 2009 e 2017).

Por fim, ao analisar o comportamento da 0 DHN, pode-se afirmar que a tendência geral da posição da linha de costa média, ao longo do período estudado, é de recuo, que se deve à diminuição do volume de sedimentos disponíveis. Além disso, foi verificado, por meio da declividade média da ponta da praia, que o recuo observado corresponde a um abatimento de aproximadamente 1 metro no perfil transversal.

6.1.2. Comparação de batimetria e alteração do volume de controle

A partir do procedimento de geração de MDE, descrito no item 5.1.2.4, foram obtidos os perfis transversais batimétricos contidos nas imagens a seguir, Figura 80 à Figura 84. As curvas em verde se referem aos dados prévios às atividades de dragagem para aprofundamento e alargamento do canal de acesso ao porto (INPH, 2007), as curvas em vermelho se referem aos dados de FUNDESPA (2014) e, por fim, as curvas em azul se referem aos dados obtidos em campo (2016).

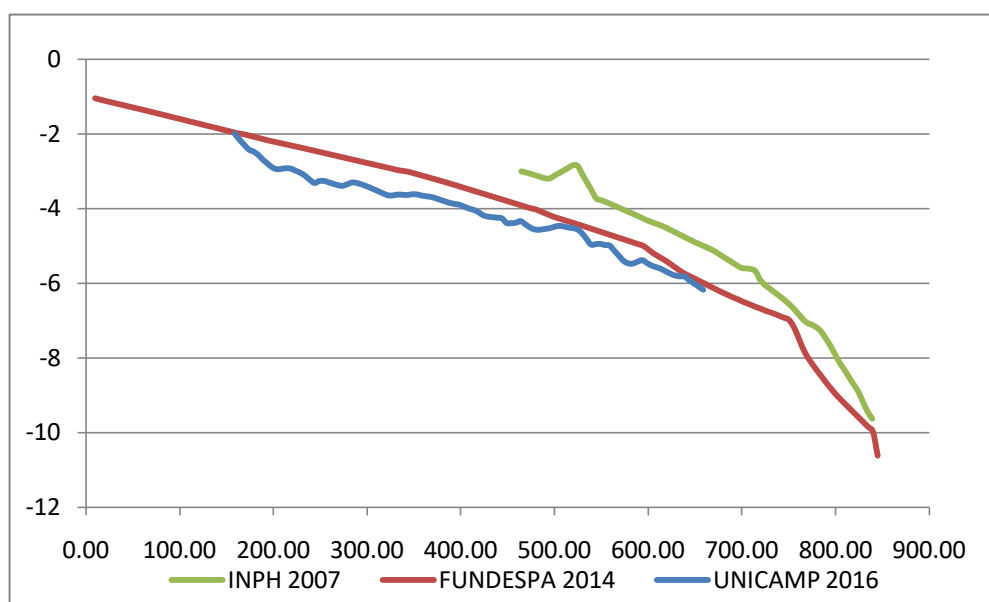


Figura 80. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-23.

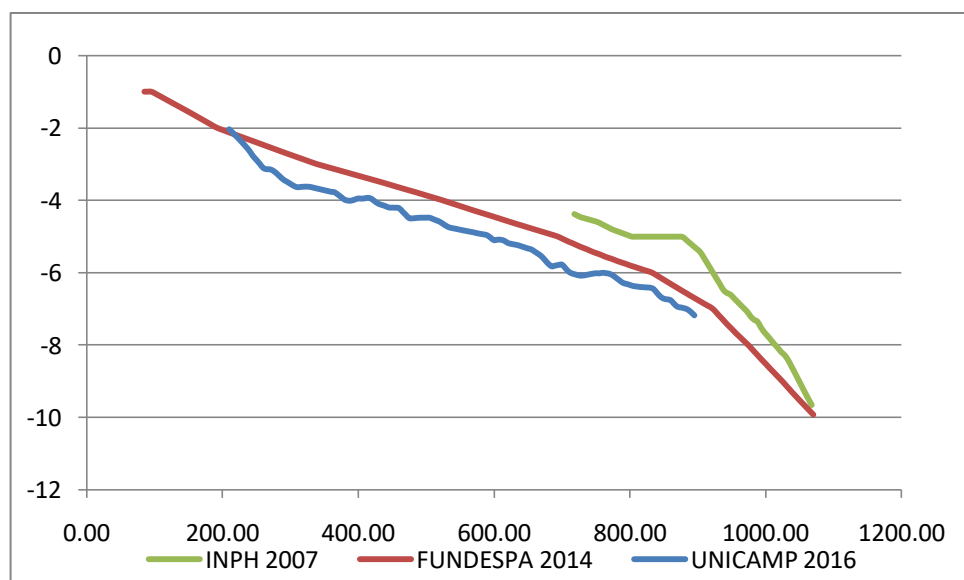


Figura 81. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-22.

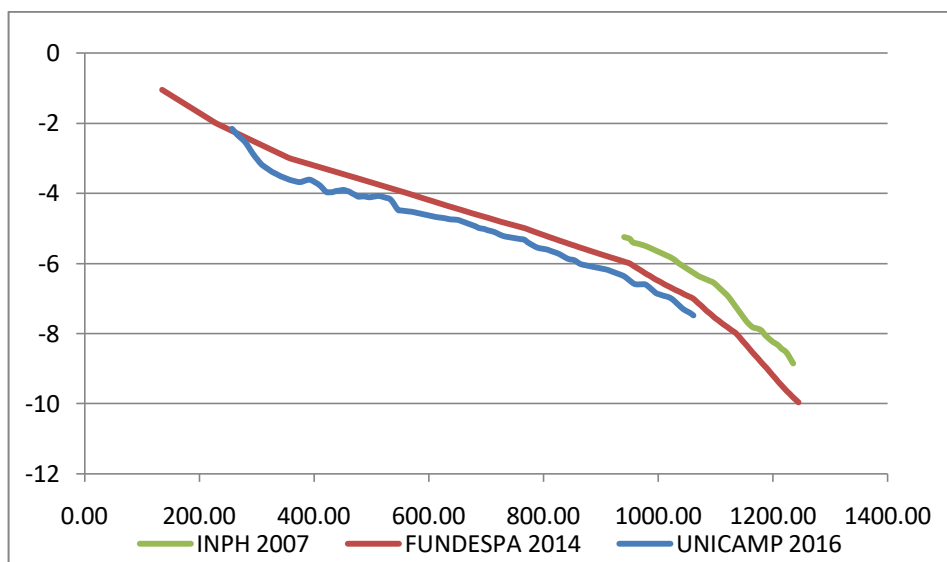


Figura 82. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-21.

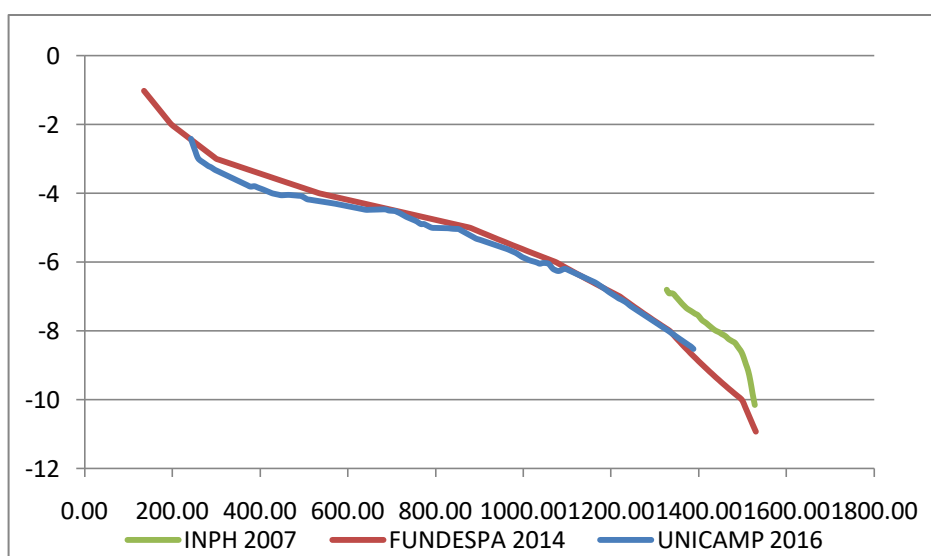


Figura 83. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-19.

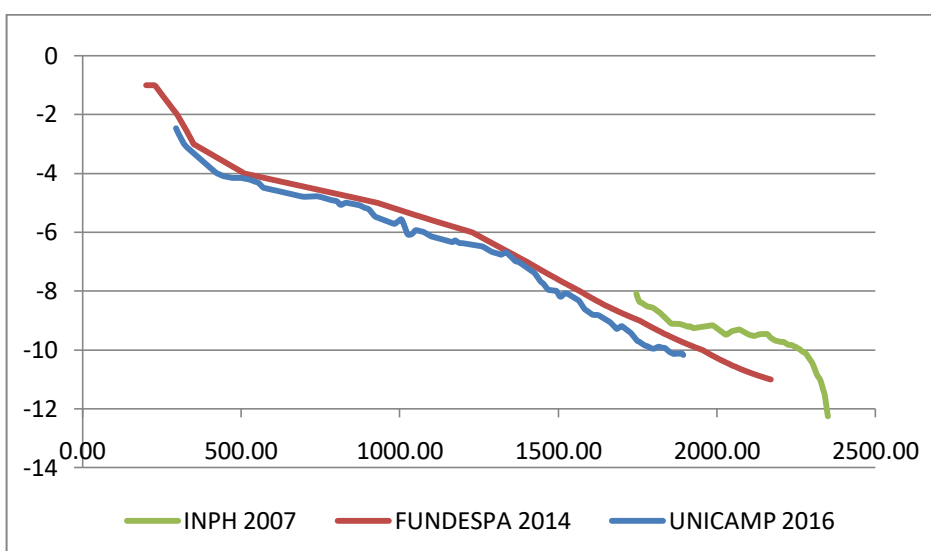


Figura 84. Perfis transversais batimétricos para a seção STOS-18.

Nota-se que houve uma erosão mais severa para os perfis STOS-23, STOS-22 e STOS-21, que estão localizados na região entre a extremidade da praia e o Canal 6. Enquanto que os perfis STOS-19 e STOS-18, apesar de também terem sofrido erosão, esta foi de menor intensidade e, portanto, menor volume. Na Figura 85 tem-se o resultado da subtração do MDE de FUNDESPA 2014 e do MDE de UNICAMP 2016, o que permitiu o cálculo de volume erodido, apresentado na Tabela 10.

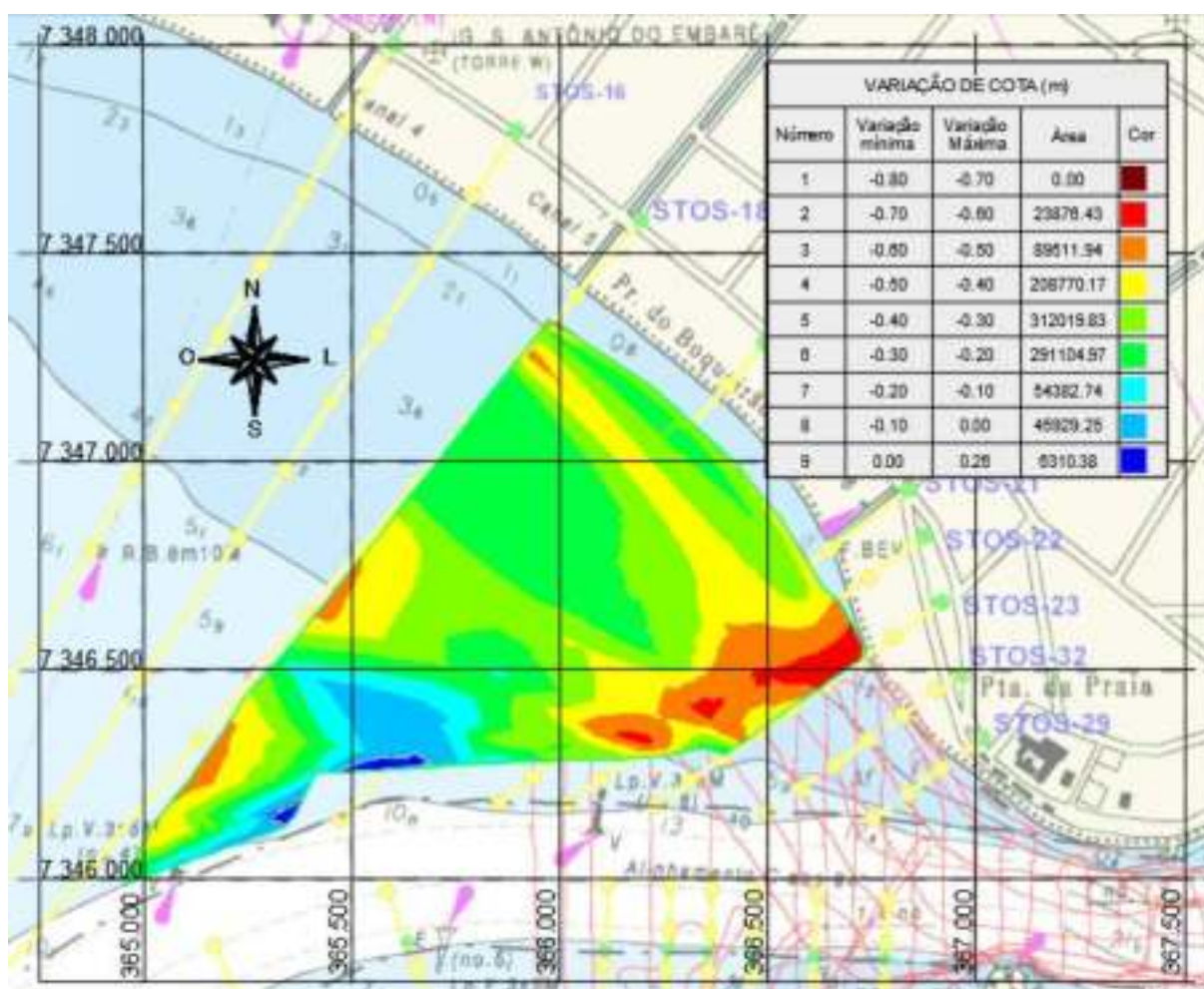


Figura 85. MDE resultante da subtração dos MDE FUNDESPA (2014) versus UNICAMP (2016).

Tabela 10. Volume erodido para os dois trechos considerados.

TRECHO	ÁREA (m ²)	VOLUME ACREÇÃO (m ³)	VOLUME ERODIDO (m ³)	MAX. DIFERENÇA DE COTAS (m)	MÍN. DIFERENÇA DE COTAS (m)
STOS-23 a STOS-21	152.261	0	78.288	0,654	0,171
STOS-23 a STOS-18	1.047.436	445	350.646	0,654(erosão)	0,255(acreção)

Como já verificado na análise dos perfis batimétricos, o cálculo dos volumes complementa o diagnóstico de processo erosivo em andamento na região compreendida entre o Canal 5 e a extremidade da praia. Entretanto, como já apontado anteriormente, a taxa erosiva é muito mais alta no trecho entre o Canal 6 e a extremidade da praia (aproximadamente 22% da erosão ocorre em apenas 15% da área), região que é muito mais suscetível à ação das ondas e correntes por não contar com a proteção (mesmo que mínima) dos canais de drenagem.

Para complementar a análise, adotando-se os cenários definidos no item 5.2.1., tem-se, da Figura 86 à Figura 88, a apresentação das diferenças de cotas, para a área de estudo, em três comparações:

- (i) Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 2;
- (ii) Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 3;
- (iii) Diferença de cotas entre os Cenário 2 e Cenário 3.

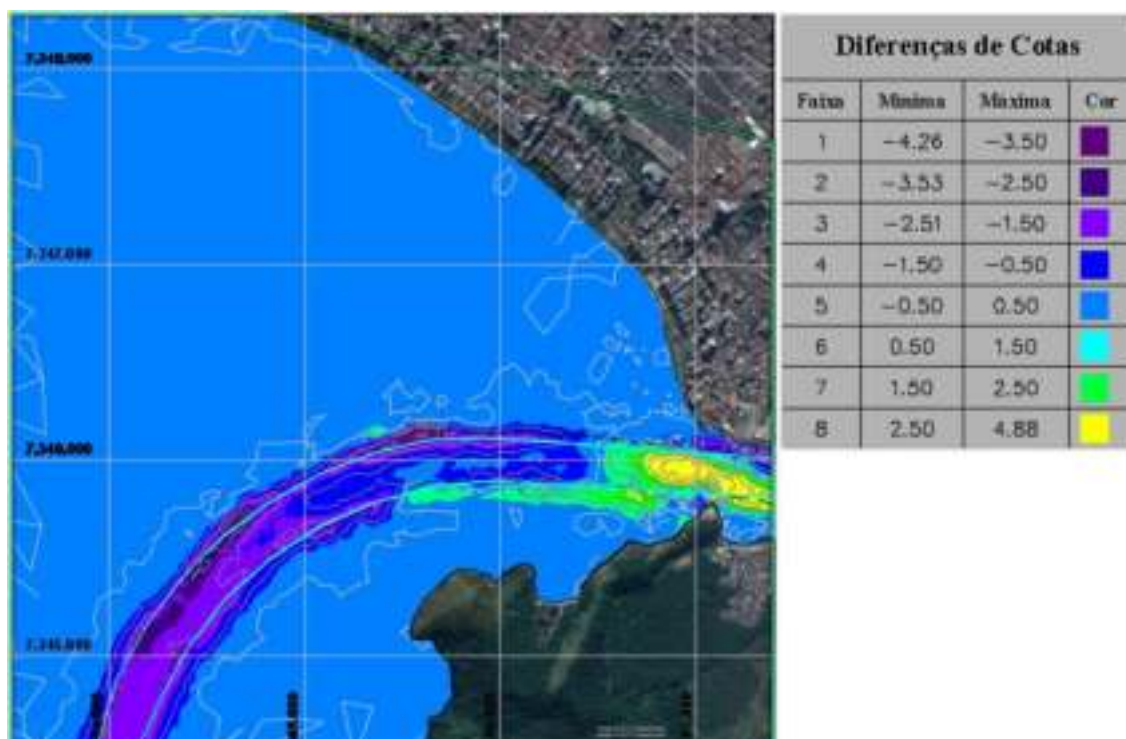


Figura 86. Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 2.

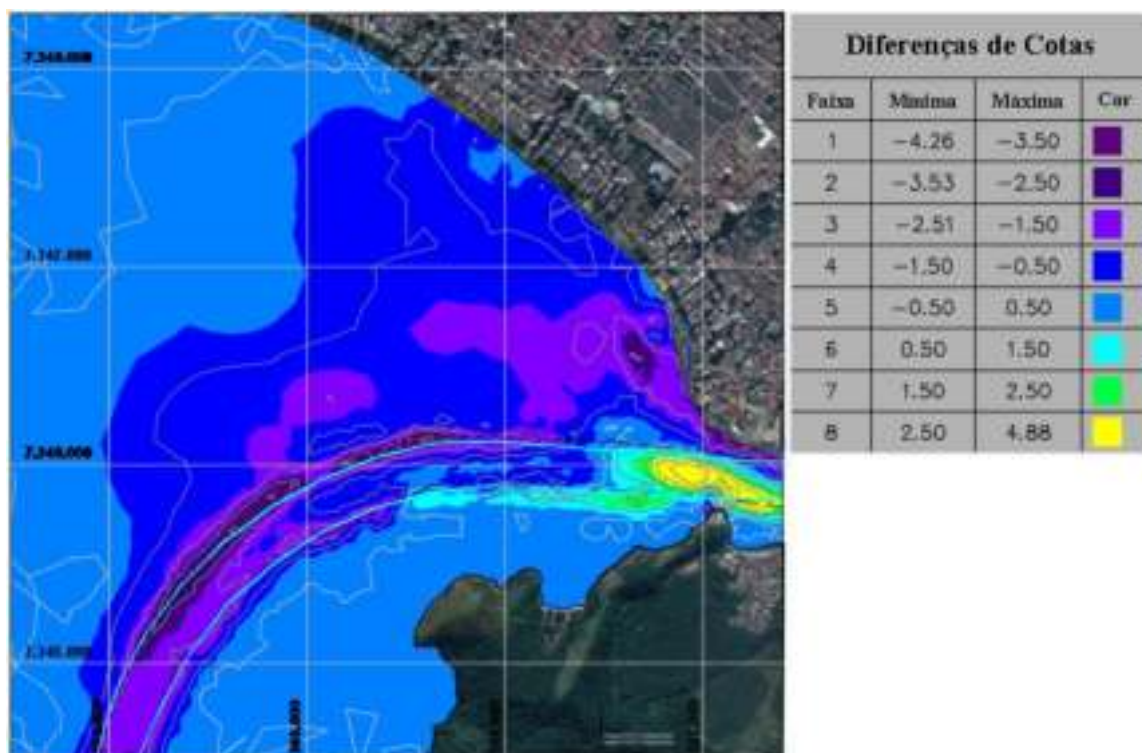


Figura 87. Diferença de cotas entre os Cenário 1 e Cenário 3.

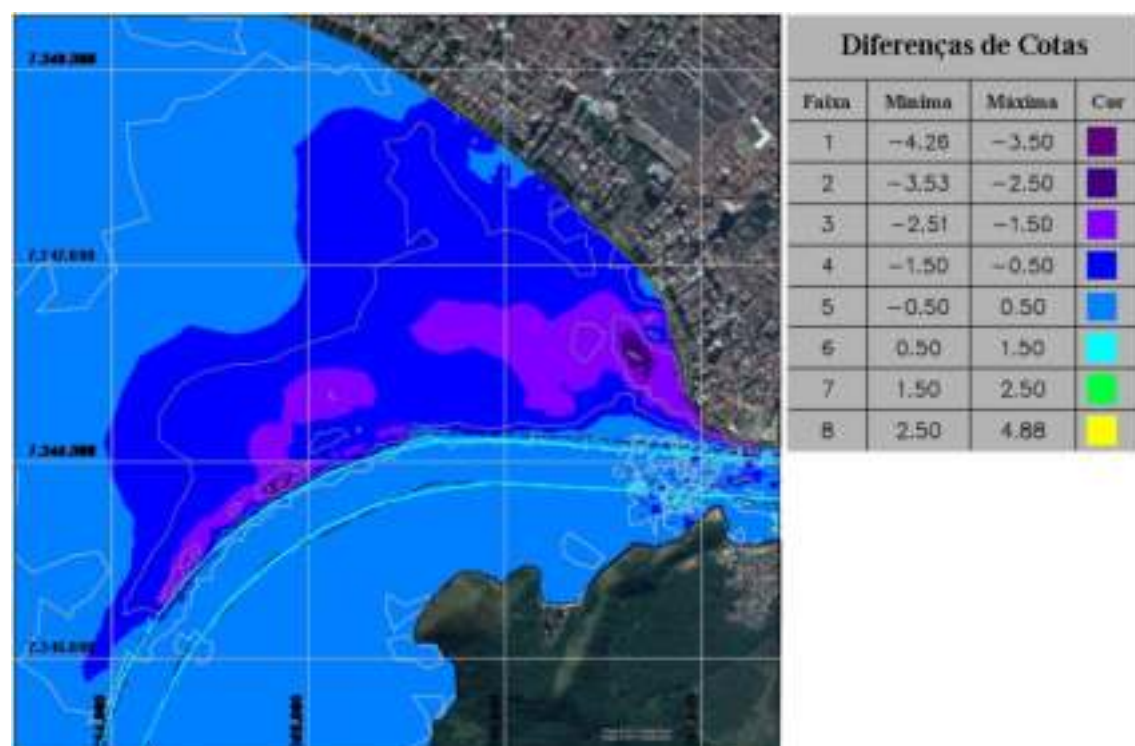


Figura 88. Diferença de cotas entre os Cenário 2 e Cenário 3.

Apesar de os cenários representarem mosaicos de informações, nota-se nas Figura 87 e Figura 88 a formação de uma espécie de sumidouro na região próxima à extremidade da praia (cores entre as Faixas 1 e 2), isto é, tem ocorrido uma perda intensa de sedimentos e, conseqüentemente, resultando em um processo erosivo

bem acentuado. Observa-se ainda que os estudos em modelo matemático realizados pela FCTH (2017) apontam uma tendência totalmente divergente, com potencial de acúmulo de sedimentos justamente onde os levantamentos apontaram maior erosão (Figura 51).

6.2. Modelagem Mike 21

Conforme detalhado no item 5.2, as simulações foram executadas em dois módulos diferentes, sendo assim, a apresentação e análise dos resultados manterá a ordem previamente estabelecida.

6.2.1. Módulo Flow Model FM – HD

Para os instantes de maré estabelecidos na Tabela 7 do item 5.2.2., foram obtidas as imagens da Figura 89 à Figura 97.

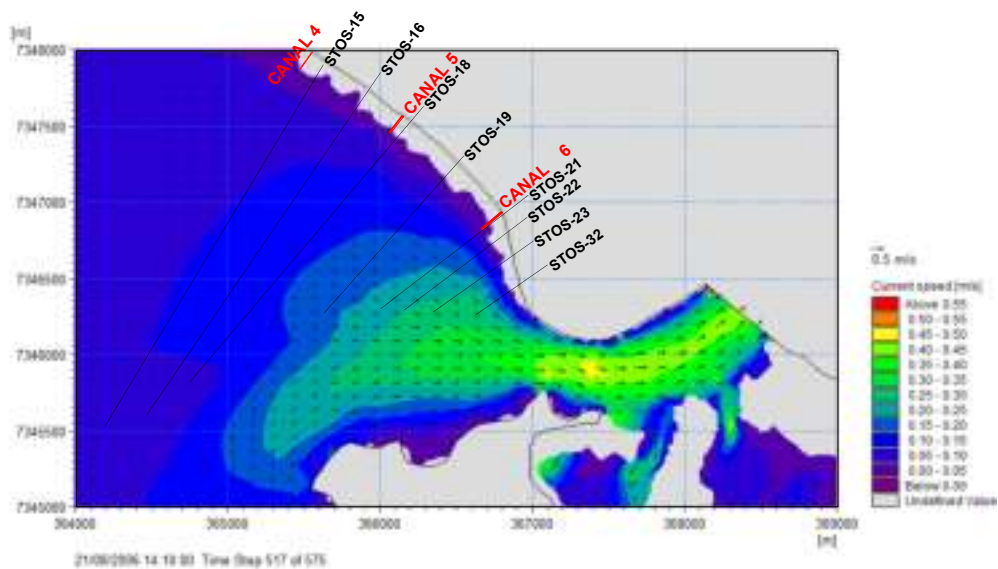


Figura 89. Cenário 1 do *time step* 517 (meia maré enchente).

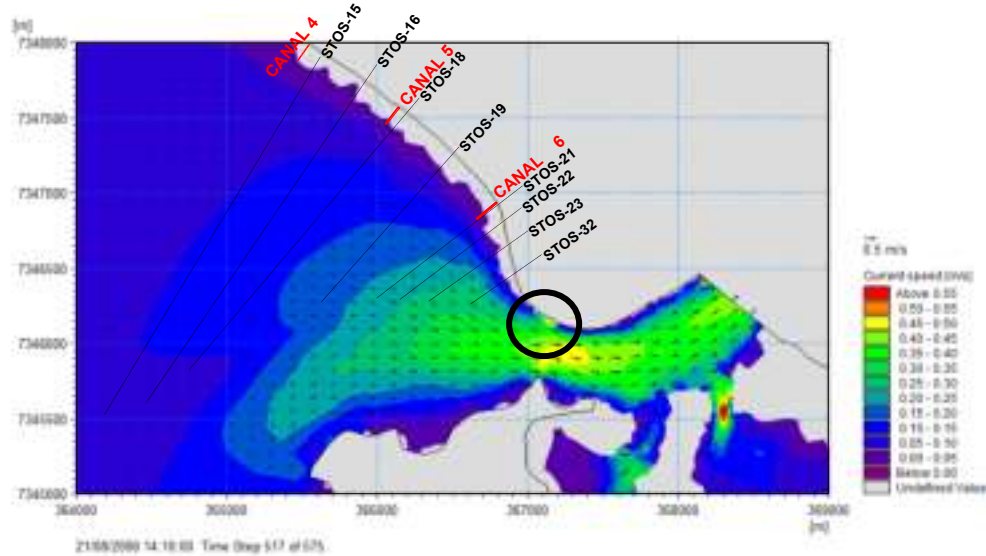


Figura 90. Cenário 2 do *time step* 517 (meia maré enchente).

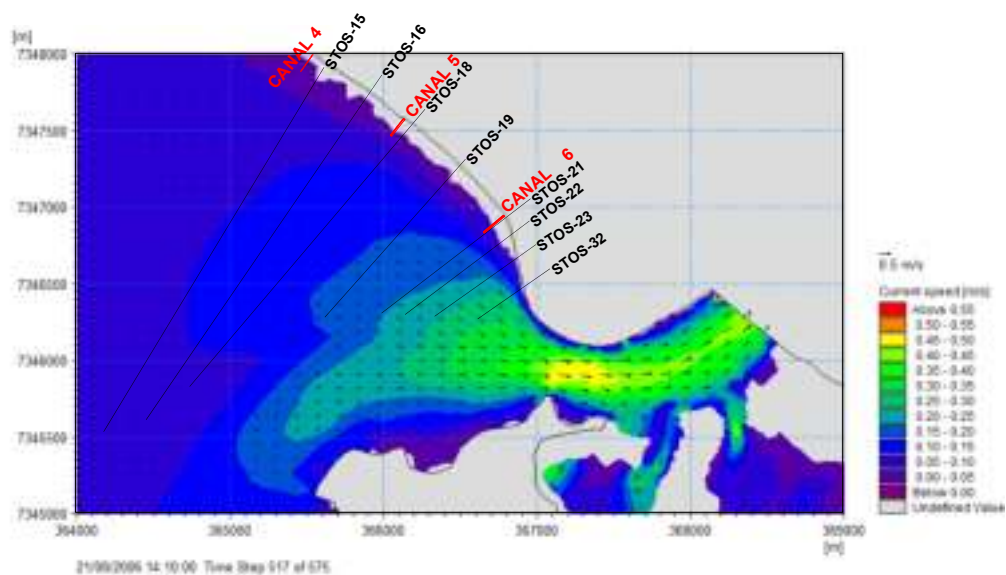


Figura 91. Cenário 3 do *time step* 517 (meia maré enchente).

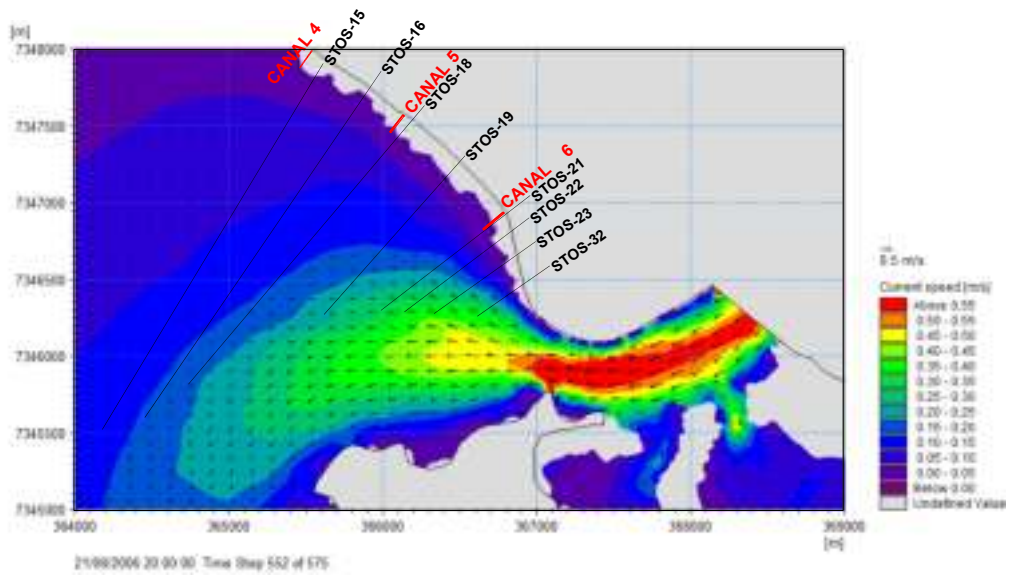


Figura 92. Cenário 1 do *time step* 552 (meia maré vazante).

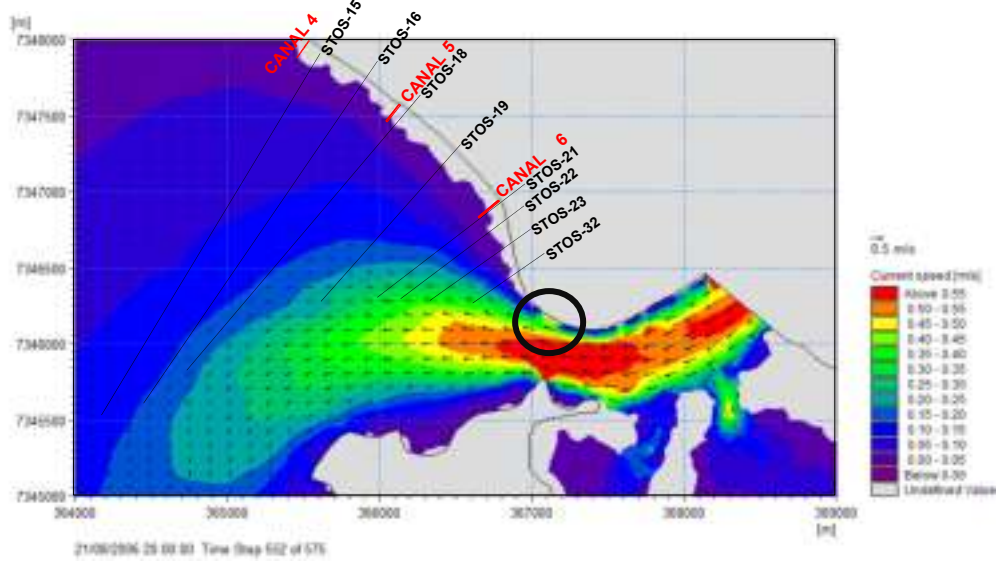


Figura 93. Cenário 2 do *time step* 552 (meia maré vazante).

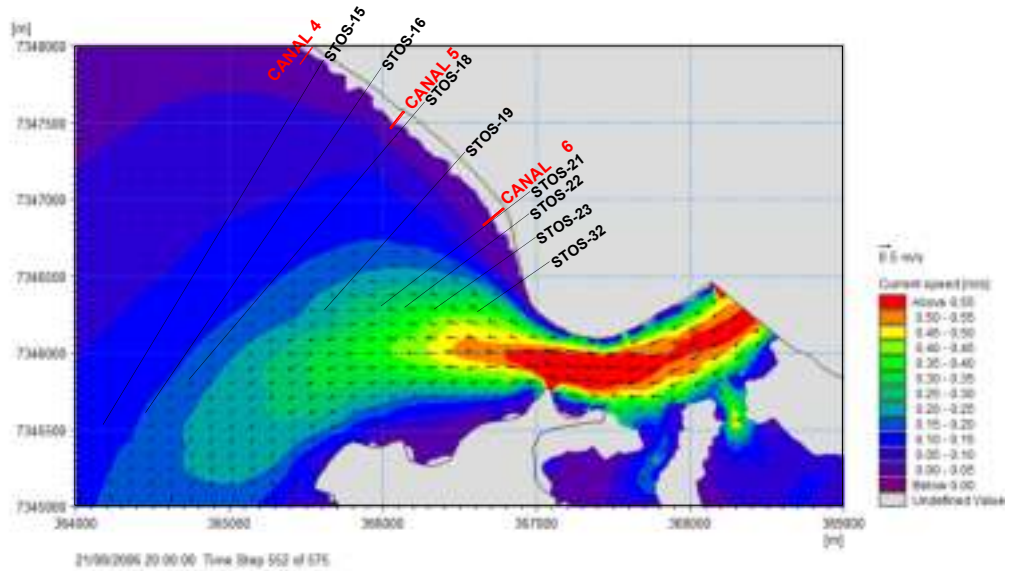


Figura 94. Cenário 3 do *time step* 552 (meia maré vazante).

Para o instante de meia maré enchente, Figura 89 à Figura 91, ao se comparar o Cenário 2 com o Cenário 1 (base), percebe-se um aumento de velocidades nas proximidades do estrangulamento da embocadura e uma aproximação das correntes junto à margem direita do canal. É importante frisar que tais alterações ocorreram devido apenas às mudanças de profundidade e largura do canal de acesso. Já na comparação entre o Cenário 3 e o Cenário 2, após a acomodação dos perfis praiais, houve um avanço considerável das correntes em direção à linha de costa da região da Ponta da Praia

Ao analisar o instante de meia maré vazante, Figura 92 à Figura 94, a comparação entre os Cenários 2 e 1 mostra o mesmo incremento de velocidades citado anteriormente, porém com maior intensidade. Além disso, houve uma concentração de correntes em relação ao eixo do canal de acesso, que foi alterado, e ocorreu, também, aumento de velocidades das correntes na região adjacente à orla da ponta da praia. A comparação entre os Cenários 3 e 2, por sua vez, mostra um avanço e realinhamento significativo das correntes em direção à linha de costa da Ponta da Praia, além de uma redução de velocidade das correntes dentro do canal e adjacências. Tal fenômeno é resultado do aumento da seção transversal, decorrente da erosão (e posterior acomodação) do perfil praial.

Por fim, para o instante de maré de uma hora antes da baixa-mar, Figura 95 à Figura 97, ao se comparar o Cenário 2 em relação ao 1, além das mesmas conclusões dos dois instantes anteriores, pode-se apontar o surgimento de uma zona de recirculação próximo à região da Ponta da Praia (destacada com uma seta vermelha na Figura 96) com correntes indo em direção ao canal de acesso. Já na comparação entre os Cenários 3 e 2, há um aumento das velocidades na zona de recirculação, esta gerada após atividades de dragagem e identificada no Cenário 2.

É importante destacar uma pequena descontinuidade na malha do Cenário 2, destacada com um círculo preto nas Figuras 86, 89 e 92. Ela indica um incremento de velocidades, entretanto é uma região que não possui informações batimétricas por estar localizada abaixo do Deck dos Pescadores. Logo, é possível que tenha ocorrido uma má interpolação da malha batimétrica por conta do *software* de simulação.

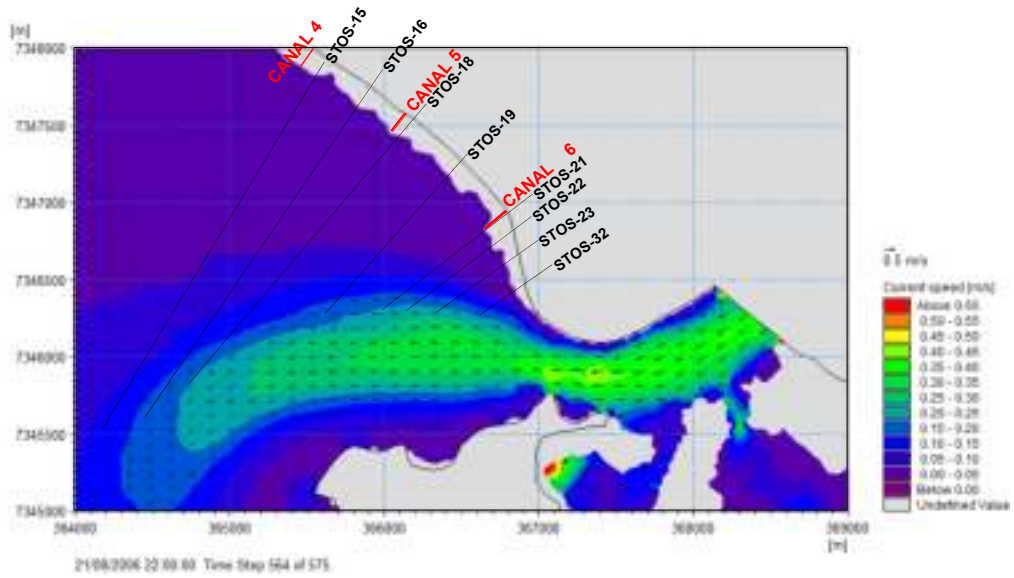


Figura 95. Cenário 1 do time step 564 (1 hora antes da baixa-mar).

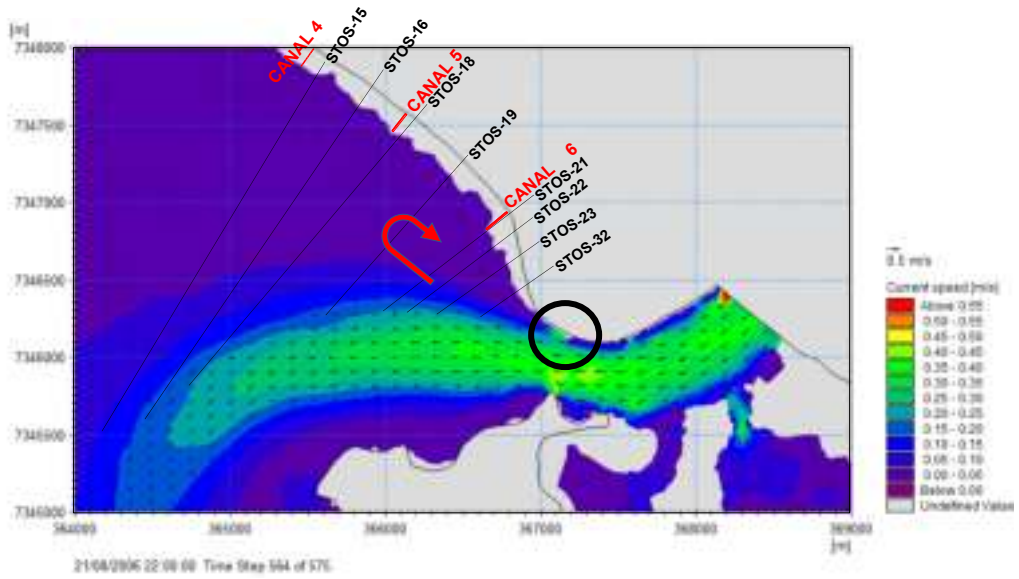


Figura 96. Cenário 2 do time step 564 (1 hora antes da baixa-mar).

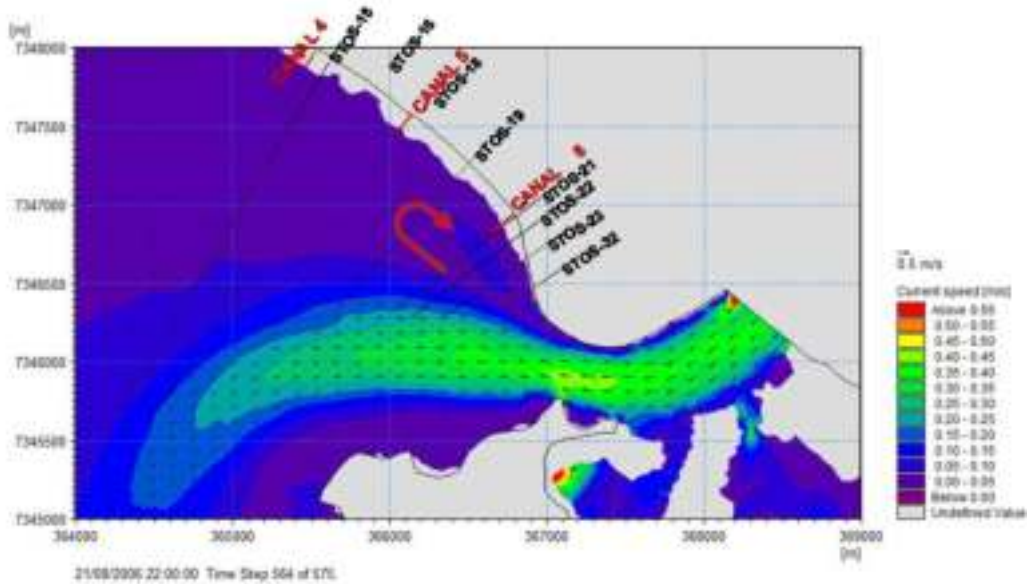


Figura 97. Cenário 3 do time step 564 (1 hora antes da baixa-mar).

6.2.2. Módulo SW

Na Tabela 11 é apresentado o resumo da calibração de ondas para a condição com correntes aplicada no modelo.

Tabela 11. Calibração de ondas para condição com correntes.

SIMULAÇÃO	ONDA NA BORDA (X_a)			ONDA ADCP (X_m)			DIFERENÇA (%)		
	HS (M)	TP (S)	RUMO (°)	HS (M)	TP (S)	RUMO (°)	HS	TP	RUMO
1	4,28	11,0	193,0	3,922	11,06	183,4	11%	1%	2%
2	3,80	11,0	190,0	3,571	11,05	181,8	1%	0%	1%
3	3,75	11,0	188,5	3,506	11,06	181,2	0%	1%	1%
4	3,76	10,95	187,0	3,525	10,99	180,5	0%	0%	0%

As saídas do módulo SW para os instantes de meia maré enchente e meia maré vazante são apresentadas a seguir, bem como as diferenças das alturas significativas de onda entre os Cenários 1 e 2, e Cenários 2 e 3, Figura 98 à Figura 107.

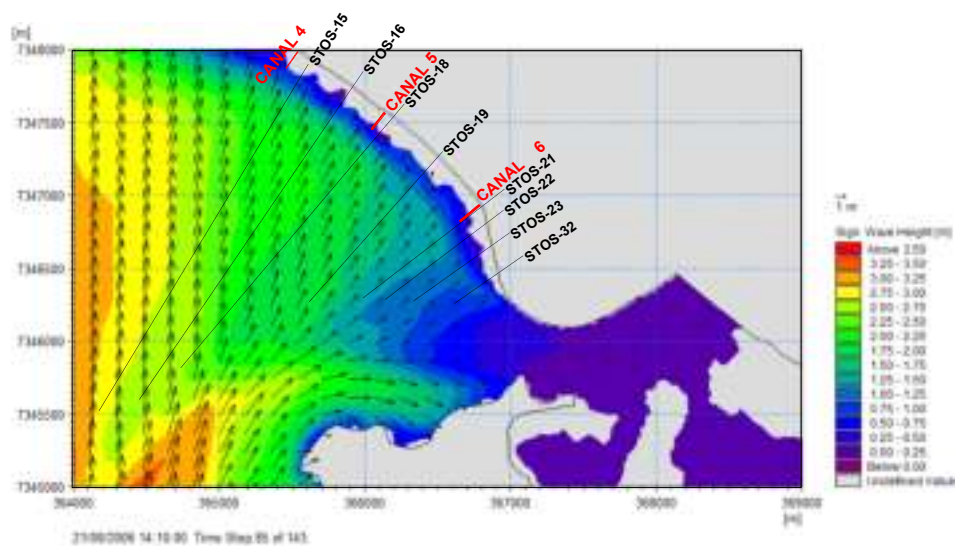


Figura 98. Cenário 1 do *time step* 85 (meia maré enchente).

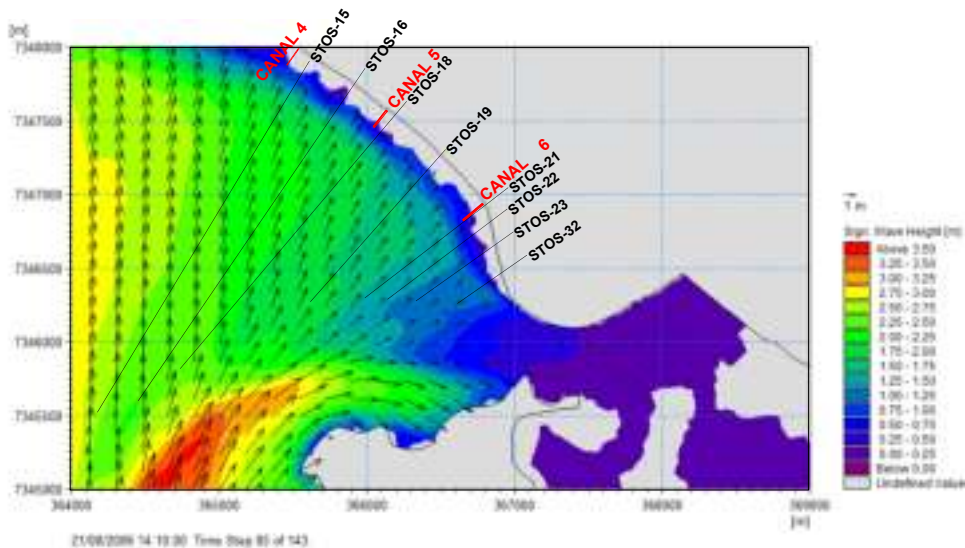


Figura 99. Cenário 2 do *time step* 85 (meia maré enchente).

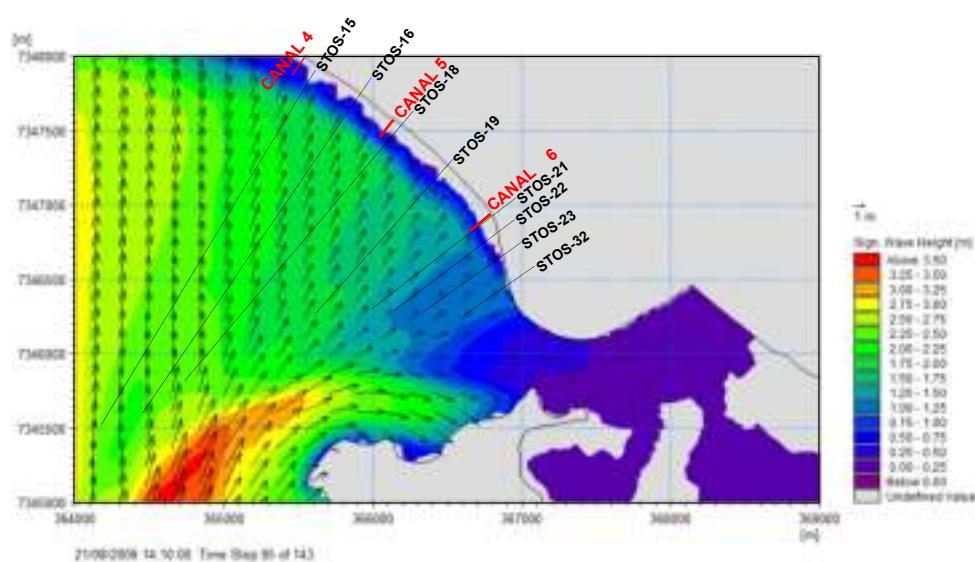


Figura 100. Cenário 3 do *time step* 85 (meia maré enchente).

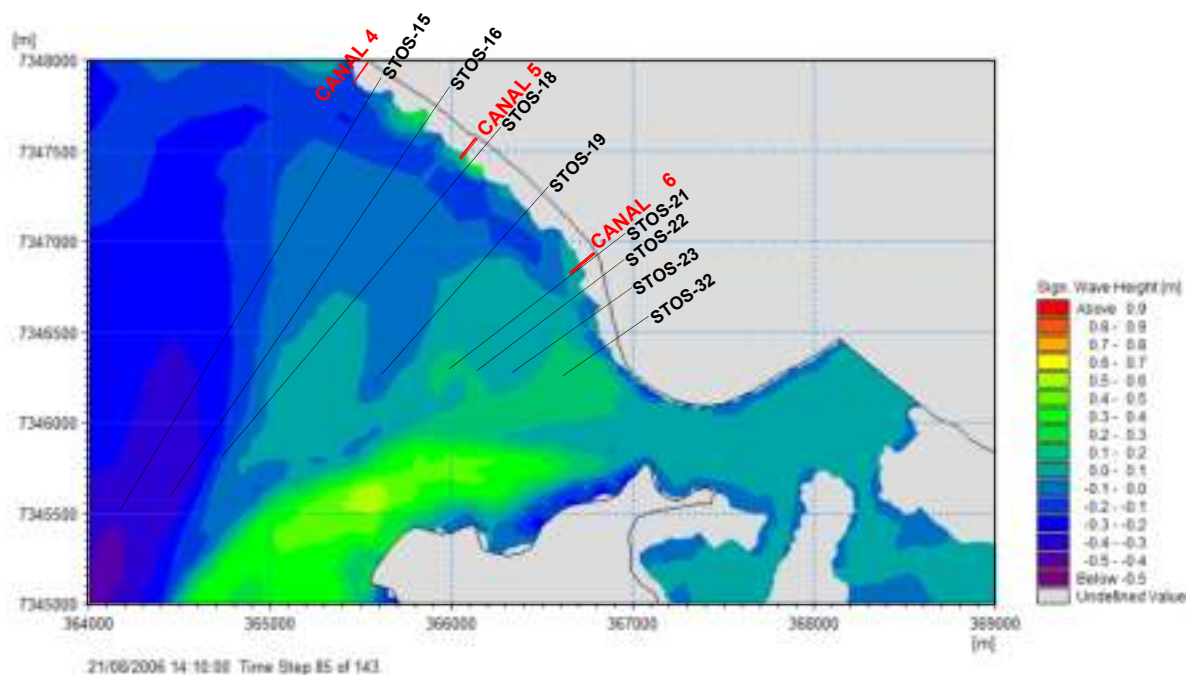


Figura 101. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 1 e Cenário 2 para o *time step* 85 (meia maré enchente).

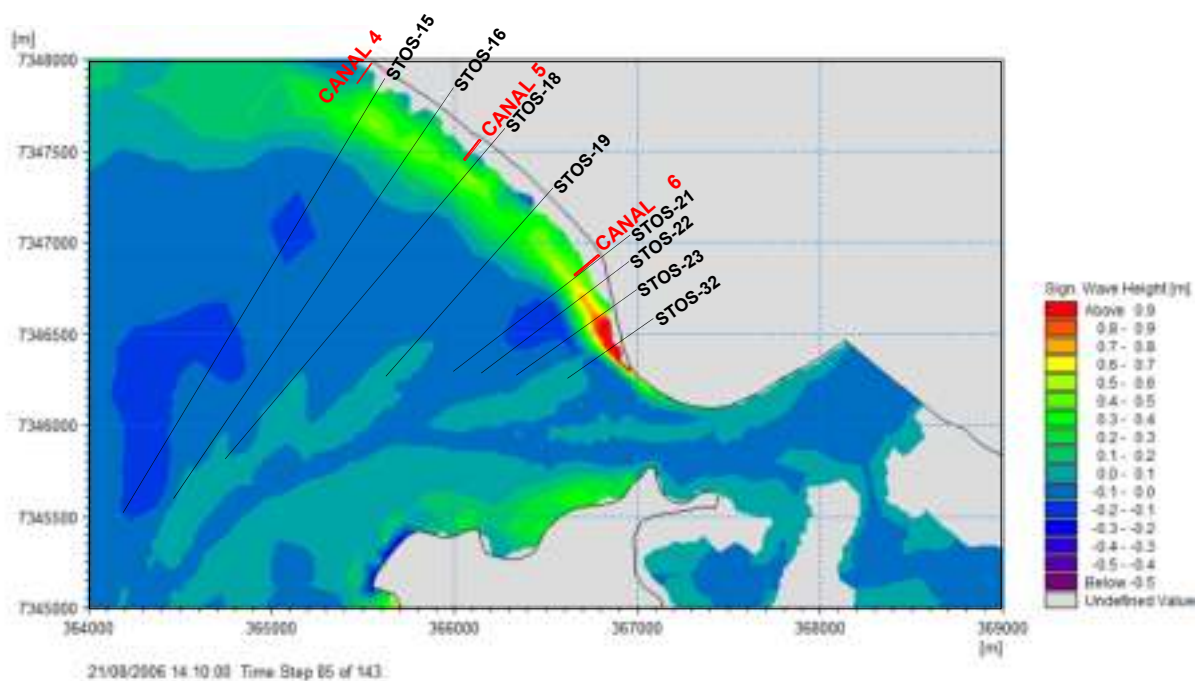


Figura 102. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 2 e Cenário 3 para o *time step* 85 (meia maré enchente).

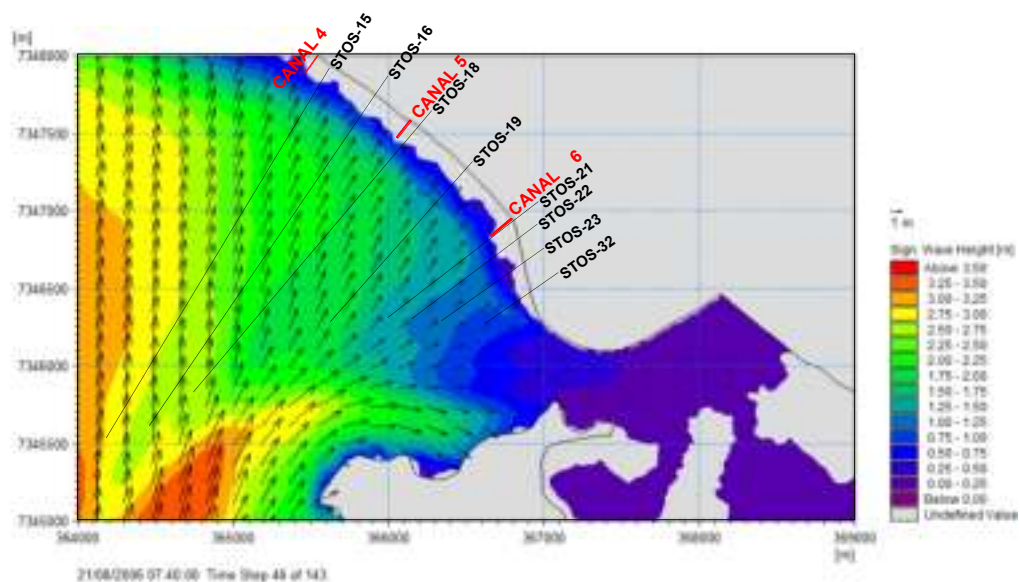


Figura 103. Cenário 1 do *time step* 46 (meia maré vazante).

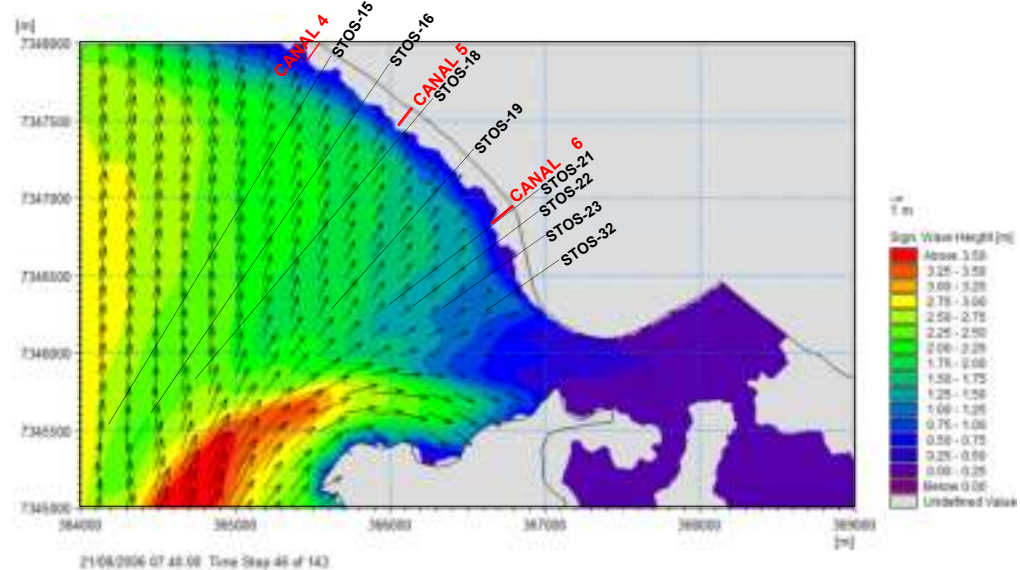


Figura 104. Cenário 2 do *time step* 46 (meia maré vazante).

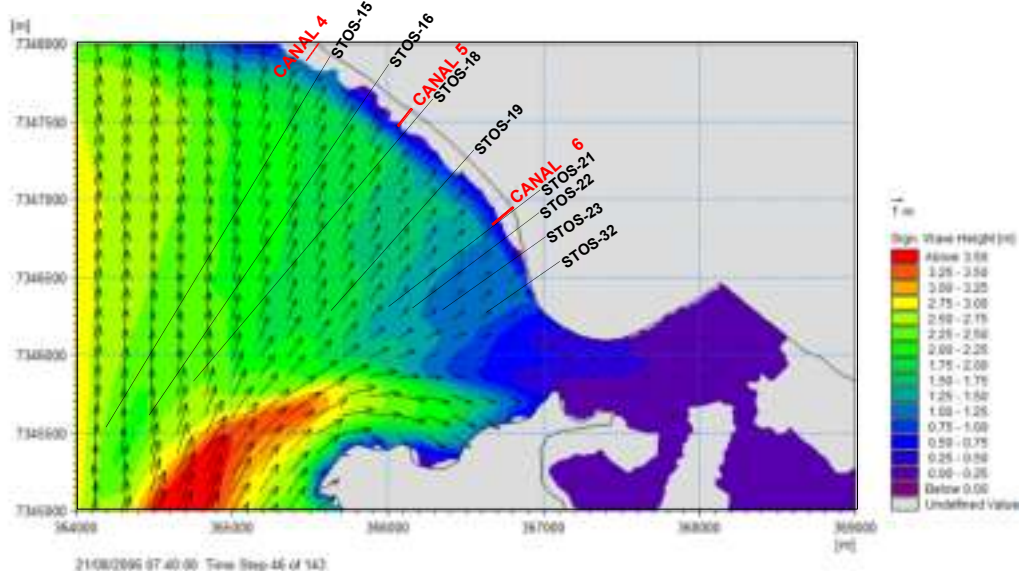


Figura 105. Cenário 3 do *time step* 46 (meia maré vazante).

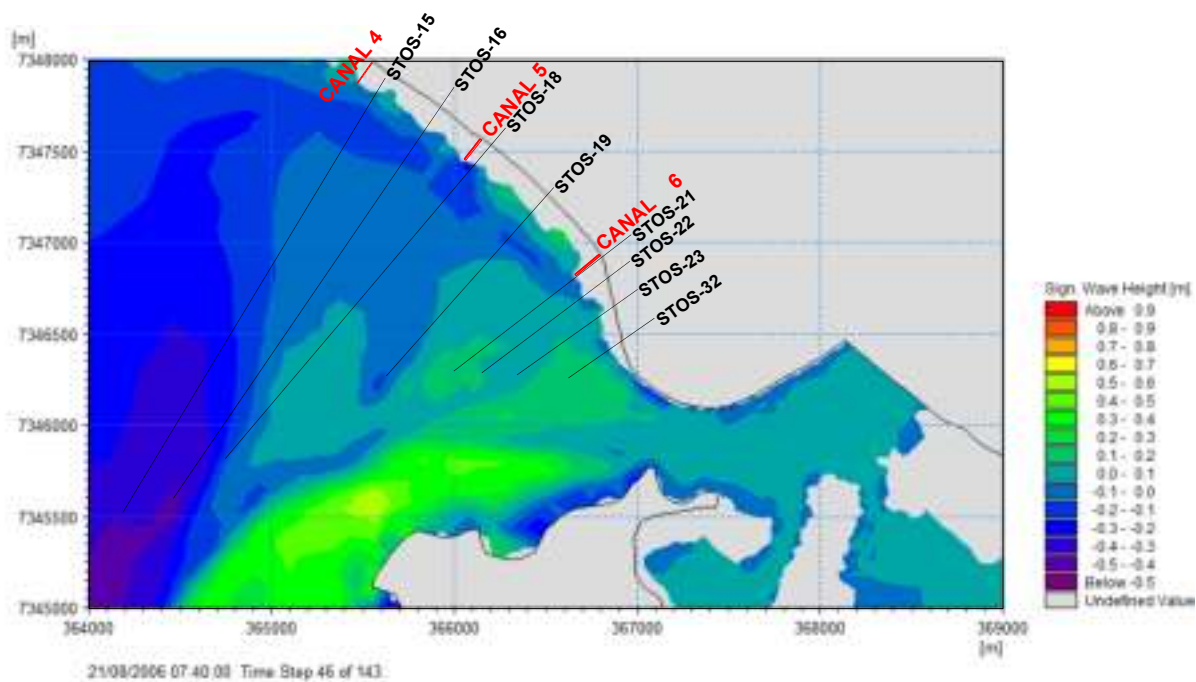


Figura 106. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 1 e Cenário 2 para o *time step* 46 (meia maré vazante).

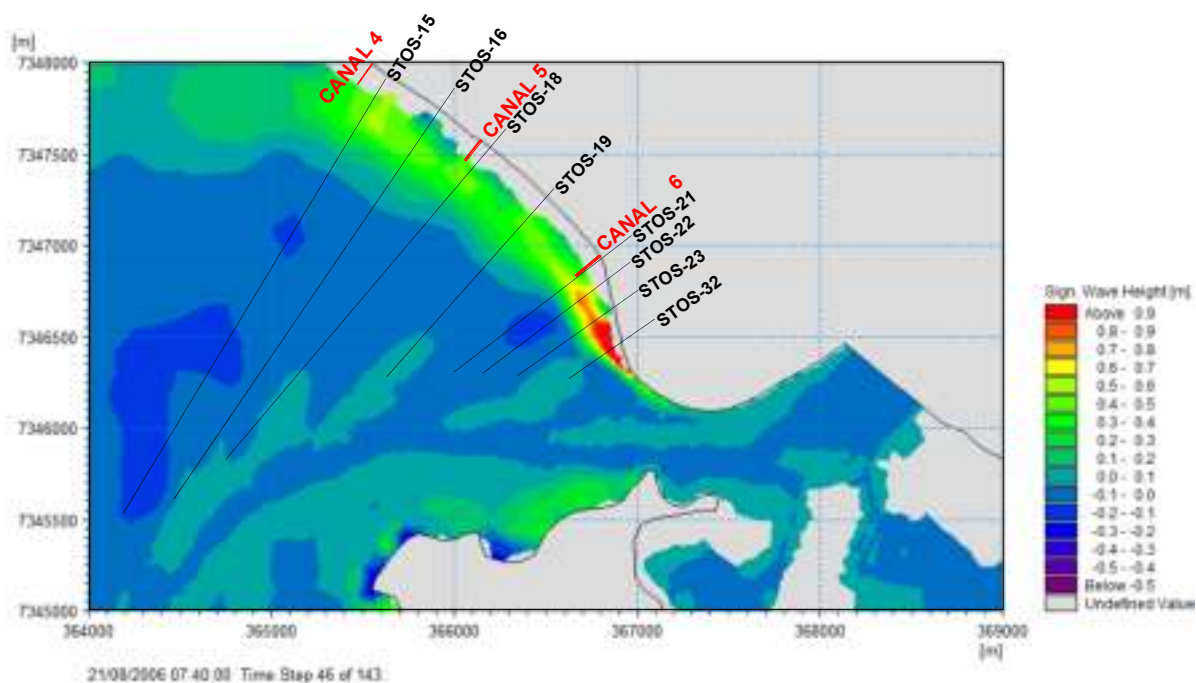


Figura 107. Diferenças entre as alturas significativas de onda do Cenário 2 e Cenário 3 para o *time step* 46 (meia maré vazante).

Analisando, inicialmente, o Cenário 1 (base), nota-se que há uma redução considerável da altura significativa de onda em direção à ponta da praia, tomando como ponto de referência inicial o Canal 4. Tal diminuição ocorre em função do modelo não resolver o fenômeno de difração. É importante ressaltar que a região da Ponta da Praia tem, em suas proximidades, os contornos rochosos da ilha do Guarujá, além dos enrocamentos na orla de Santos que visam proteger estruturas como a avenida da praia e demais construções. Essa configuração costeira é responsável por altos índices de reflexão e difração das ondas, o que causa alterações em seus rumos e energia. Entretanto, mesmo sem a resolução do fenômeno de difração pelo módulo SW, é possível fazer análises e tirar algumas conclusões.

Ao comparar o Cenário 2 com o Cenário 1, percebe-se um realinhamento do rumo das ondas próximo ao Guarujá, além de um grande incremento na altura significativa das ondas neste mesmo trecho. Ao analisar a Figura 101, pode-se afirmar que houve aumento na altura significativa de onda que varia de 10 a 20 centímetros na região da Ponta da Praia, e um aumento que supera 50 centímetros nas proximidades do Guarujá.

A comparação entre os Cenários 3 e 2, por sua vez, aponta uma aproximação da zona de arrebatamento, e conseqüentemente das ondas, da orla da Ponta da Praia. E a análise da Figura 102 indica um incremento nas alturas significativas de onda que variam de 10 centímetros até aproximadamente 1 metro devido à erosão do perfil praial.

Apesar das respostas das saídas apresentadas para os instantes de meia maré enchente e meia maré vazante serem muito semelhantes, é essencial apontar que existe uma pequena variação no comportamento das alturas de onda em função da direção das correntes, principalmente se tratando da região do canal de acesso. Ademais, a análise dos resultados para baixa-mar e preamar, não exibidos aqui, permitiram estabelecer as mesmas conclusões apresentadas para os instantes de meia maré.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região a Ponta da Praia sofreu diversas intervenções antrópicas ao longo dos anos, tais como: construção da avenida da praia e jardins de orla, implantação de muros verticais de pedra argamassada combinados com colocação de enrocamentos e atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto. Essas alterações são responsáveis por impactar diretamente a morfodinâmica da região, como pôde ser comprovado pela evolução da linha de costa, que teve uma variação significativa após o ano de 2010, com recuos de até 57 metros para a ponta da praia em relação à 0 DHN e um abatimento vertical de aproximadamente 1 metro. Além disso, a partir dos dados de campo fica evidente que o abatimento do perfil praiial se estende desde a pós-praia até o canal do porto.

A modelagem matemática, por sua vez, mostrou que ao alterar apenas a batimetria do canal de acesso ao Porto, isto é, somente atualizar os dados para a situação de pós-dragagem (Cenário 2), resultou em uma modificação no padrão de circulação das correntes na região da Ponta da Praia, além de incrementos significativos de velocidade e elevação da altura de onda. A combinação desses fenômenos, portanto, explica as alterações dos perfis praiiais medidos em campo.

Ao se modelar essas alterações de perfil (Cenário 3) foi possível constatar diversos eventos importantes. Para o modelo hidrodinâmico (*Flow Model FM – HD*) observou-se uma aproximação das correntes de enchente junto à orla da Ponta da Praia, enquanto que na vazante houve uma redução de velocidades devido à erosão (maior seção transversal). Ao final da vazante pôde-se verificar, ainda, um aumento de velocidades na zona de recirculação, esta criada junto à ponta da praia após as atividades de dragagem, em direção ao canal, o que corrobora com as constatações realizadas em campo. Assim sendo, todo esse quadro indica que o perfil de praia ainda não alcançou uma nova configuração de equilíbrio, resultando em uma tendência de continuidade dos processos erosivos, principalmente nos trechos de menor profundidade.

No que diz respeito à modelagem dos efeitos de onda, o modelo espectral (SW) apresentou acréscimos de altura significativa de ondas, principalmente nas proximidades da linha da costa da região da Ponta da Praia. Entretanto, os modelos espectrais não reproduzem corretamente a realidade de direção e altura de ondas

na região de estudo, devido a não inclusão da difração no equacionamento matemático, o que pode resultar em distorções nos resultados.

O incremento de alturas significativas implica em ondas mais altas e, conseqüentemente, mais energéticas que, ao atingirem as estruturas reflexivas existentes (muros e enrocamentos) na área de estudo, acentuam o processo erosivo já verificado. Ademais, ao somar tais condições às conseqüências supracitadas geradas pelas correntes, tem-se um quadro que propicia intensa erosão. Tal contexto, aliado a uma maior incidência de ressacas, dá um indicativo de que os resultados obtidos por modelo espectral são subestimados no que diz respeito à realidade.

Tendo em vista a complexidade da hidromorfodinâmica da região estudada, uma estratégia alternativa para estudos futuros seria a utilização de projetos-piloto de pequeno porte e fácil desmonte, combinados com o uso de modelos de propagação de ondas que contemplem a difração e reflexão de maneira adequada. Como visto, esses efeitos de ondas em águas rasas interferem significativamente nos resultados obtidos. Por fim, a partir do monitoramento dessa implantação seria possível fazer análises e obter uma melhor compreensão da dinâmica do ambiente de interesse para, então, propor soluções definitivas.

Tais soluções devem integrar interesses públicos, sociais e ambientais, visando principalmente à recuperação das praias erodidas, e à proteção dos jardins de orla e equipamentos urbanos. Desta forma, o restabelecimento da extensão da faixa de areia deve ser planejado de forma a não inviabilizar as metas de expansão do Porto de Santos. E, ainda assim, ser eficaz na redução da energia das ondas, evitando que estas atinjam os muros e enrocamentos existentes na orla da Ponta da Praia e, conseqüentemente, mitigando os impactos decorrentes das ressacas que assolam a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÂNGULO, R. J. *Aspectos físicos das dinâmicas de ambientes costeiros, seus usos e conflitos*. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Editora UFPR, n. 10, p. 175-185, 2004.
- ANTHONY, F. J. Beach erosion. In: SCHWARTZ, M. L. *Encyclopedia of Coastal Science*, Springer Publishers, p. 140-144, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13.133/1994: Execução de levantamento topográfico*. 35 p., 1994.
- BANAT, A. K. ; NUNES, L. A. P. Santos, Jardins da Orla - referência urbana para a comunidade. *Paisagem e Ambiente*, n. 15, p. 81-102, jan. 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i15p81-102>>. Acesso em: 01 nov. 2017.
- BAPTISTELLI, S. C. *Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista* (Estado de São Paulo). Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-24112008-150611>>. Acesso em: 22 dez. 2017.
- BIRKEMEIER, W. A. Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 111, n. 3, p. 598-602, maio 1985.
- BRIGIDO, D. *O que fazer em Santos e região: Parque Roberto Mário Santini*. 19 jul. 2016. Disponível em: <<http://www.revistanove.com.br/parque-roberto-mario-santini/>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

BRUUN, P. *Coast erosion and the development of beach profiles*. Washington: US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1954 (Technical Memorandum n. 44).

_____. Stability of Tidal Inlets Theory and Engineering. In: BRUUN, P. (Org.). *Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier B.V, p. 1-506., 1978.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/journal/01651250/23/supp/C>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

_____. The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages. *Journal of Coastal Research*, v. 4, n. 4, p. 627-648, outono 1988.

CALLIARI, L. J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO Jr., E. Morfodinâmica praial: uma breve revisão. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 51, p. 63-78, 2003.

CAPOBIANCO, M.; LARSON, M.; NICHOLLS, R.; KRAUS, N. *Depth of closure: a contribution to the reconciliation of theory, practice and evidence*. In: COASTAL DYNAMICS CONFERENCE, 3, 1997, Plymouth, United Kingdom. Proceeding of Coastal Dynamics '97, American Society of Civil Engineers Press, p. 506-515, jun. 1997.

CARDOSO, A. "Maré". In: *Gestão Costeira Integrada: Glossário*. 2007. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/mare.html>>. Acesso em: 21 out. 2017.

CARMO, J. S. A. *Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira*. 1. ed. Portugal: Imprensa da Universidade de Coimbra, 452 p., 2016.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (MARMIL). *Dados observacionais*, 2008. Disponível em:

<<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/dados/dados.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

_____. *Cartas Raster*, 2015. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Acesso em: 30 set. 2015.

COELHO, A. de L.. *Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em séries de 18,69 anos*. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UNICAMP, Campinas, 2016. Disponível em: <http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/321859/1/Coelho_AndredeLima_M.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2017.

COMPANHIA DE DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (CODESP). *Análise do movimento físico do Porto de Santos: Dezembro de 2016*. Santos: Codesp, 9 fev. 2017. Disponível em: <http://189.50.187.200/docpublico/amf_cpt/2016/amf-2016-12.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

CORREA, T. B.; SOUZA, C. M. M. A.; GIRELI, T. Z. *The Influence of Tidal Prism on Port of Santos Dredging*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES (PIANC COPEDEC), IX, 2016, Rio de Janeiro. Port and Coastal Environmental Issues and Climate Change.

DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *SWAN - User Manual SWAN Cycle III version 41.20*. 2017. Disponível em: <<http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

DELTA, Delta Economics & Finance. Especial: Maiores e Melhores Cidades do Brasil: Retrato Desigual. *AméricaEconomia*, out. 2014., p. 24. Disponível em: <<https://deltaefrankings.files.wordpress.com/2014/11/rae-ranking-de-cidades-20141.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

DELTARES. *Delft3D Flexible Mesh Suite 2016*. Disponível em: <<https://www.deltares.nl/en/news/delft3d-flexible-mesh-suite-2016-now-available-for-download/>>. Acesso em: 05 dez. 2017.

DANISH HIDRAULIC INSTITUTE (DHI). *Mike 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module User Guide*. Software Support Center, 2016a.

_____. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*. Software Support Center, 2016b.

_____. *Mike 21 SW – Spectral Wave FM Module User Guide*. Software Support Center, 2016c.

_____. *Mike 21 SW – Spectral Wave FM Module Scientific Documentation*. Software Support Center, 2016d.

_____. *Mike 3*. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-3>>. Acesso em: 05 dez. 2017a.

_____. *Mike 21*. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21>>. Acesso em: 05 dez. 2017b.

_____. *LITPACK*. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/litpack>>. Acesso em: 05 dez. 2017c.

FARINNACCIO, A.; GOYA, S. C.; TESSLER, M. G. Variações da linha de costa nas baías de Santos e São Vicente. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 1, n. 1, p. 42-48. 2009. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/14389/10593>>. Acesso em: 01 nov. 2017

FLORENZANO, T. G. (Org.). *Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais*. 1. ed. Oficina de Textos, 2008. 320 p.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (FCTH). *Estudo e pesquisa de obras para a otimização morfológica, náutica e logística do canal de acesso do Porto de Santos*. São Paulo: Codesp/FCTH, 2017. Relatório Técnico nº 1 RT 01-1157-16 (fev. 2017).

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS AQUÁTICAS (FUNDESPA). *RDC - 120612 - Estudo sobre a Hidrodinâmica e o Transporte de Sedimentos na Ponta da Praia de Santos e Praia do Góes*. Santos: Codesp/Fundespa, 2013a.

_____. *Anexo 3 RDC – 120612: Análise Histórica dos Registros de Ressacas ocorridos na região da Baía e Estuário de Santos* (jul. 2013). Santos: Codesp/Fundespa, 2013b.

_____. *Anexo 6 RDC – 120612: Avaliação da Estabilidade do Talude do Canal de Navegação e Modelagem Morfodinâmica na Baía de Santos* (jul. 2013). Santos: Codesp/Fundespa, 2013c.

_____. *Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Santos*. Santos: Codesp/Fundespa, 2011. 2º Relatório Técnico Semestral RTS 140611 (jul.-nov. 2010).

_____. *Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Santos*. Santos: Codesp/Fundespa, 2012. 4º Relatório Técnico Semestral RTS 030912 (jan. 2010-dez. 2011).

_____. *Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Santos*. Santos: Codesp/Fundespa, 2014. Relatório do Monitoramento dos Sedimentos da Superfície de Fundo e Caracterização do Transporte Sedimentar Residual no Setor Nordeste da Baía de Santos. Amostragem 2013.

_____. *Programa de Monitoramento do Perfil Praial*. Parecer técnico. Santos: Codesp/Fundespa, jan.-maio 2010.

_____. *Programa de Monitoramento do Perfil Praial*. Parecer técnico. Santos: Codesp/Fundespa, jul.-dez. 2013.

GARCIA, P. D.; ARAÚJO, R. N.; SILVA, G. da C.; BAPTISTELLI, S. C.; ALFREDINI, P. *Preparo de Bases Batimétricas, de Agitação e Circulação para o Litoral do*

Estado de São Paulo. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI, Escola Politécnica da USP, v. 1, n.105, p. 1-56, 2002

GIRELI, T. Z.; SOUZA, C. M. M. A.; NOBRE, L.B; GARCIA, P. D. The efficiency of curved jetties in Bay of Santos – SP: numerical modeling. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 5, pp. 1-17., 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716092>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

GOOS-BRASIL. Aliança Regional para a Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical - OCEATLAN. *Programa Nacional de Boias*. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

HALLERMEIER, R. J. *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16, 1978, Hamburgo. Proceedings of 16th Conference on Coastal Engineering. Nova York: American Society of Civil Engineers Press, 1978, p. 493-1512.

_____. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, v. 4, p. 253-277, 1981.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W). *Continental Shelf Research*, v. 23, n. 16, p. 1597-1613, out. 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434303001432>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

HINTON, C.; NICHOLLS, R. J. *Spatial and temporal behavior of depth of closure along the Holland coast*. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 26, 1998, Copenhagen. Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers Press, p. 2913-2925, 1998.

HOUSTON, J. R. *Beach-fill volume required to produce specific dry beach width*. Coastal Engineering Technical Note CETN II-32. Vicksburg: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1995.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades: Histórico: Santos*. 2016. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santos/historico>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

INSTITUTO Militar de Engenharia (IME). *Modelagem Hidrodinâmica do Porto de Santos. Relatório Final*. IME, jan. 2008. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos2/Anexo%20C%20-%20Modelagem%20Matem%C3%A1tica/Modelagem%20Matem%C3%A1tica%20da%20Hidrodin%C3%A2mica.pdf> Acesso em: 01 nov. 2017.

INSTITUTO Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). *Relatório INPH nº 018 / 2007 - Projeto Geométrico da Infra-Estrutura Aquaviária ao Porto de Santos - SP - Anexo XI*. Rio de Janeiro, 2007.

ITALIANI, D. M. *Resposta morfodinâmica à alimentação artificial da Ponta da Praia, Santos, SP*. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Geológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 93 f., 2014.

JET PROPULSION LABORATORY. California Institute of Technology. *TOPEX/Poseidon: Ocean Surface Topography from Space*. Disponível em: <<https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

KING, C.A.M. *Beaches and Coasts*. 2. ed. Hodder & Stoughton Educational, 580 p., 1972.

KJERFVE, B. Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: DAY JR., J. W. et al. *Estuarine ecology*. New Jersey: Wiley-Blackwell, p. 47–78, 1989.

KOMAR, Paul D. *Beach Processes and Sedimentation*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

KRAUS, N. C.; LARSON, M.; WISE, R. A. *Depths of closure in beach fill design*. In: NATIONAL CONFERENCE ON BEACH PRESERVATION TECHNOLOGY, 12, 1999, Saint Petersburg, Florida. Proceedings of 12th National Conference of Beach Preservation Technology. Tallahassee: Shore and Beach Preservation Association, p. 271-286, 1999.

LARSON, M.; KRAUS, N. C. *Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina*. Marine Geology, v. 117, n. 1-4, p. 75-94, mar. 1994.

LEATHERMAN, S. P. Shoreline Change Mapping and Management Along the U.S. East Coast. *Journal of Coastal Research*, n. 38, p. 5-13, 2003. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/25736596>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

MANGOR, K; DRØNEN, N. K; KÆRGAARD, K. H.; KRISTENSEN, S. E. *Shoreline Management Guidelines*. 4. ed. Horsholm: DHI Water & Environment, 2017. Disponível em: <https://www.dhigroup.com/upload/campaigns/shoreline/assets/ShorelineManagementGuidelines_Feb2017-TOC.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2017.

MUEHE D. Definição de limites e tipologia da orla sob aspectos morfodinâmico e evolutivo. In: *Projeto Orla: Subsídios para um Projeto de Gestão*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, p. 12-32, 2004.

_____. Erosion in the Brazilian coastal zone: an overview. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 43-48, 2006.

MUEHE, D.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praial. *Quaternary and Environmental Geosciences*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 121-124, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v5i2.35884> >. Acesso em: 21 mar. 2018.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Environmental Modeling Center. *NOAA WAVEWATCH III*. Disponível em: <<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

NICHOLLS, R. J.; LARSON, M.; CAPOBIANCO, M.; BIRKEMEIER, W. A. *Depth of Closure: Improving Understanding and Prediction*. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 26, 1998, Copenhagen. Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers Press, 1998, p. 2888-2901.

OLIVEIRA, C. J.; SANTOS, M. A. Os Canais de Saturnino : documentário conta história de um projeto pioneiro . *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, IAU-USP, n. 22, p. 120-133, jan. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i22p120-133>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

OPEN UNIVERSITY. *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

PORTO DE SANTOS. Autoridade Portuária. *Programa de Gestão do Patrimônio Arqueológico, Histórico e Cultural (Etapas Prospecção, Resgate e Monitoramento): Obras de Dragagem e Derrocamento no Porto Organizado de Santos/SP*. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos1/>. Acesso em: 01 nov. 2017.

RANGEL-BUITRAGO, N. G.; ANFUSO, G; WILLIAMS, A. T. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, v. 114, p. 129-144, set. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>>.

ROSSI, M. Santos tem maior jardim de orla do mundo, segundo Guinness Book. *Portal de Notícias G1*, Santos, 23 set. 2013. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2013/09/maior-jardim-em-extensao-do-mundo-e-atracao-em-santos.html>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. *Revista Ambiente & Água*, v. 11, n. 2, p. 566-585, 2016a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise das Trajetórias das Águas Continentais Afluentes ao Sistema Estuarino de Santos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 242-250, 2016b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312016000100242&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p242-250>.

SABATIER, F.; STIVE, M. J. F.; PONS, F. *Longshore variation of depth of closure on a micro-tidal wave-dominated coast*. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 29, 2004, Lisboa. *Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering*, set. 2004, v. 3, p. 2327-2339.

SABESP. *Emissário Submarino de Santos completa 35 anos*. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaold=65&id=5508>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SCHWARTZ, M. L. The Bruun Theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *The Journal of Geology*, University of Chicago, v. 75, n. 1, p. 76-92, jan. 1967.

SHORT, A. D. Three dimensional beach-stage model. *The Journal of Geology*, University of Chicago, v. 87, n.5, p.553-571, set. 1979.

SITE DA PREFEITURA DE SANTOS. Disponível em: <<http://www.santos.sp.gov.br/>>. Acesso em: 15 junho 2017.

SONDOTÉCNICA ENGENHARIA DE SOLOS S.A. *Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista*. Relatório Final e Desenhos. São Paulo: Portobrás/INPH, 1977.

SOUZA, C. M. M. A. *Caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista utilizando a modelagem numérica*. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, 2012. Disponível em:

<<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258518>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

_____. *Comparação de modelos numéricos bidimensional e tridimensional para a avaliação de mudanças ambientais, aplicado à região costeira de Santos*. 2017. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/322035>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SOUZA, C. R. de G. A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Consequências, Indicadores de Monitoramento e Risco. In: *Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de um Ano de Conhecimento Acumulado*. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Instituto de Botânica/SMA. p. 48-69, 2009.

SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P.; FERREIRA, R. S. *Monitoramento Praial antes e durante as obras de dragagem do Porto de Santos, São Paulo (Brasil)*. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE GESTIÓN INTEGRADA DE ÁREAS LITORALES, I, 2012, Espanha. v. 1. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/303299539_Monitoramento_Praial_antes_e_durante_as_obras_de_dragagem_do_Porto_de_Santos_Sao_Paulo_Brasil>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P.; HARARI, J. Long Term Analysis of Meteorological-Oceanographic Extreme Events for the Baixada Santista Region. In: NUNES, L.H.;

GRECO, R.; MARENGO, J. A. (Org). *Climate change in Santos, Brazil: projections, impacts and adaptation options*. Springer (no prelo).

SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; DE OLIVEIRA, P. E. (Ed.). *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2005. 378p.

SUN EARTH TOOLS: *Ferramentas para designers e consumidores de energia solar*. Disponível em: <https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=pt.>. Acesso em 16 mai. 2017.

SWAN TEAM. *SWAN - Simulating Waves Nearshore*. Disponível em: <<http://swanmodel.sourceforge.net/>>. Acesso em: 05 dez. 2017.

TELLES, D. D.; GOIS, J. S. de; GARCIA, P. D. Ambientes Costeiros. In: TELLES, D. (Org.). *Ciclo Ambiental da Água - da Chuva à Gestão*. 1ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2012, v. 1, p. 415-432

TESSLER, et al. São Paulo. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. 2. ed. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006, p. 297-346. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/sp_erosao.pdf>. Acesso em: 24 out. 2017.

TOLMAN, Hendrick L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. 2002. 139 p. Disponível em: <http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB_222.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2017.

TRABANCO, J. L. A. *Conceitos e Técnicas Modernas de Monitoramento da Crosta Terrestre e sua Vinculação com o Estudo do Nível Médio do Mar – Uma Análise das Estações Maregráficas de Cananeia e Ubatuba*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *Shore Protection Manual*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1984, 2 vols.

VAN DER WEGEN, M.; DASTGHEIB, A.; ROELVINK, J. A. Morphodynamic modeling of tidal channel evolution in comparison to empirical PA relationship. *Coastal Engineering*, v. 57, n. 9, p. 827-837, set. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.04.003>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

VAN RIJN, L.C. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, n. 12, p. 867-887, dez. 2011.

VENANCIO, K. K.; GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D. *Evolução da linha de costa na região da Ponta da Praia em Santos - SP*. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. Florianópolis: ABRH, nov. 2017.

VIVA SANTOS. *Aquário Municipal de Santos*. Disponível em: <<http://www.vivasantos.com.br/aquario/historia/main.htm>>. Acesso em: 01 nov. 2017

WRIGHT, L. D. & SHORT, A. D. *Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia*. In: KOMAR, P. D. (Ed.). *Handbook of coastal processes and erosion*. Boca Raton: CRC Press, p. 35-64, 1983.

XBEACH OPEN SOURCE COMMUNITY. *XBeach*. Disponível em: <<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>>. Acesso em: 05 dez. 2017.