JULIA REID

**Evolução temporal da dinâmica do sistema estuarino
de Santos (SP): efeitos das alterações morfológicas**

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Ciências, Programa de Oceanografia, área de
Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo
2019

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

Evolução temporal da dinâmica do sistema estuarino de Santos (SP): efeitos das alterações morfológicas

JULIA REID

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de
Oceanografia, área de Oceanografia Geológica

Julgada em 13/02/2020

Membros da Banca:

Prof. Dr. Michel Michaelovitch de Mahiques (IO/USP)

Conceito

Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes (UFSB)

Conceito

Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini (IGc/USP)

Conceito

Prof. Dr. Eduardo Siegle

Presidente

São Paulo

2019

AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa. Este trabalho também foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001).

Ao Arquivo Estadual de São Paulo pela ajuda em encontrar e fotografar a carta náutica de 1876.

Aos Colegas e amigos no Instituto Oceanográfico; Bruna Garcia, Lilian Seiler, Samuel Yang pelas conversas e ajudas tanto pessoais e técnicas, Marcos Tonelli pelos cafés e grande ajuda com programação no Matlab, Ana Amélia Lavenere-Wanderley que pouco convivi mas muito me ajudou; com suas considerações antes da minha qualificação. A minha recente amiga Fernanda, com quem pude compartilhar meus momentos de trabalho e almoço no IO. Ao aluno de graduação Julio Berzaghi pela ajudar com a digitalização das cartas náuticas.

Ao meu marido Felipe e a minha filha Rita, pela compreensão e suporte durante meu doutorado. O apoio do Felipe foi crucial para a conclusão da minha tese. A ajuda da minha sogra Márcia e da minha mãe Regina com a Rita também foram imprescindíveis. A minha amiga Patrícia Pinho, pelo incentivo e ‘brainstormings’ no doutorado.

Ao meu orientador Eduardo, pela confiança e apoio durante todo o percurso do doutorado, além de claro pela orientação durante esta jornada.

Ao Instituto Oceanográfico por me receber e incentivar durante meu doutorado, agradeço também à equipe da secretaria de pós-graduação, Leticia, Daniel e em especial a Ana Paula, por me acolher nas conversas de mãe para mãe. Agradeço também à equipe da cantina pelo carinho.

Todas as ciências começaram com a filosofia de se fazer perguntas, e elas abrem os pensamentos da humanidade. Quando todas as perguntas são alcançadas, tudo se colapsa novamente em filosofia.

Por G.M.E. Perillo, 1975

RESUMO

A habilidade de compreender a morfologia e hidrodinâmica estuarina, associada à evolução temporal é essencial para o gerenciamento costeiro, navegação e para o meio ambiente. Neste trabalho, é analisada pela primeira vez a evolução morfológica e suas implicações nos processos estuarinos no Sistema Estuarino de Santos (SES) em São Paulo (SP), em especial no canal do porto. A partir da validação de um modelo numérico hidrodinâmico (Delft3D) para a situação atual, cenários com batimetrias pretéritas, de 1876 a 2014, foram elaborados para a avaliação da evolução hidrodinâmica do SES. Durante o período estudado, o SES passou por mudanças morfológicas significativas, principalmente em sua batimetria no canal do porto de Santos devido às dragagens. Foi observado que variações nos processos estuarinos ao longo dos anos ocorrem onde há mudanças na morfologia. As análises de variação de volume de água do estuário, sugerem que o volume do canal do porto aumentou $12,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ao longo de mais de um século, o que representa um aumento na capacidade do canal do porto de Santos em torno de 28% entre 1876 a 2014. O ano de 2014 foi o cenário onde foram observadas as maiores diferenças em relação aos demais. Houve uma maior intrusão salina no canal do porto, diminuição dos volumes de água transportados (60%) no canal de Santos, aumento da influência da maré no sistema e aumento da sua assimetria ao longo dos anos estuário acima. As mudanças temporais dos estuários e seus efeitos merecem atenção especial, e podem ser uma ferramenta para projeções futuras de cenários de aumento do nível do mar e mudanças climáticas e no auxílio no manejo desse frágil ecossistema. Os resultados inéditos da evolução hidrodinâmica do SES mostram que o gradual processo de aprofundamento dos canais em função de dragagens, resultam em alterações locais de parâmetros de circulação estuarina, como a propagação da maré e estratificação da coluna de água; e também parâmetros relacionados ao sistema estuarino como um todo, como os transportes residuais de água, e consequentemente transporte de materiais, através dos canais do SES.

Palavras-chave: morfologia, estuário, hidrodinâmica, modelagem numérica.

ABSTRACT

The ability to understand estuarine morphology and hydrodynamics associated with temporal evolution is essential for coastal management, navigation and the environment. This pioneer study presents the morphological evolution and its implications in the estuarine processes in Santos Estuary System - SP (SES), especially in the port channel. Through the validation of a hydrodynamic numerical model (Delft3D) for current data, scenarios with earlier bathymetries (1876 to 2014) were elaborated for the evaluation of the hydrodynamic evolution of the SES. Results shows that, between 1876 and 2014, SES underwent significant morphological changes, mainly in its bathymetry in the Santos port channel due to dredging, as well as variations in estuarine processes occur where changes in morphology occur. Analyzes of the Estuary water volume variation suggests that the port channel volume has increased by $12,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ over more than a century, representing an increase of 28% of the capacity of the Santos port channel from 1876 to 2014. The year 2014 was the scenario of greater differences compared to the others. There was a greater saline intrusion in the port channel, decreased of volumes of water transported in 60% in the channel of Santos, increased tidal influence on the system and increased asymmetry up estuary over the years. Temporal changes in estuaries and their effects ought to have special attention and may be a tool for future projections of rising sea levels and climate change scenarios and to support the management of this fragile ecosystem. The unprecedented results of the hydrodynamic evolution of the SES show that the gradual process of channel deepening due to dredging results in local changes of estuarine circulation parameters, such as tidal propagation and stratification of the water column; as well as parameters related to the entire estuarine system, such as water transport, and consequently material transport, throughout the SES channels.

Keywords: morphology, estuary, hydrodynamics, numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma esquemático da estrutura e dos métodos do trabalho.....	6
Figura 2.1 Classificação dos estuários de acordo com as características de mistura (adaptado de Thurman 2017).	11
Figura 2.2 Diagrama de estratificação e circulação de (HANSEN; RATTRAY, 1966). ..	12
Figura 3.1 Mapa de localização da área do Estuário de Santos com suas principais características: canais de acesso; via de acesso de Santos (porto), via de acesso de São Vicente e via de acesso de Bertioga e os pontos de coleta de dados (ADCP/CT); SA-Santos, SV-São Vicente e BE-Bertioga, e Usina Henry Borden.	19
Figura 3.2 Esquema da região da Usina Henry (EMAE, 2016)	26
Figura 4.1 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1876. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos. ..	32
Figura 4.2 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1969. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos. ..	32
Figura 4.3 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1975. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos. ..	33
Figura 4.4 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1989. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos. ..	33
Figura 4.5 Mapa de localização dos pontos de batimetria (e topografia para pontos em terra) da carta náutica do ano de 2014. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos	34
Figura 4.6 Mapa de localização do polígono (área) do canal de Santos delimitado em cinza, tendo como seus limites inferior e superior os perfis 1 e 6 respectivamente.....	36
Figura 4.7 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1876. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçagüera.	39
Figura 4.8 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1969. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçagüera.	40
Figura 4.9 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1975. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçagüera.	41

Figura 4.10	Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1989. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçagüera.	42
Figura 4.11	Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 2014. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçagüera.	43
Figura 4.12	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 - 1876. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	46
Figura 4.13	Mapa de diferença de variação de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 - 1969. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	47
Figura 4.14	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014-1975. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	48
Figura 4.15	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 -1989. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	49
Figura 4.16	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1989-1975. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	50
Figura 4.17	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1975 - 1969. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto	51
Figura 4.18	Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1969 - 1876. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.	52
Figura 4.19	Gráfico dos perfis morfológicos 1 a 6 localizados no canal de Santos, mostrando as mudanças existentes entre os anos dos levantamentos.	54
Figura 4.20	Gráfico de evolução do volume de água (em metros cúbicos) do canal do porto de Santos ao longo dos anos de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014.....	55
Figura 5.1	Esquema da rede hidrográfica afluyente ao sistema (unidade m ³ /s). Fonte: CODESP, 2008.....	60
Figura 5.2	Localização dos pontos de vazão fluvial afluentes ao sistema.	61
Figura 5.3	Representação da grade do domínio do modelo para a região do SES. Em vermelho são as bordas abertas e em verde as bordas fechadas. Em cinza está representada a malha.	66

Figura 5.4 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 2014; (A) toda a grade, porção oceânica e estuarina e (B) região do SES.....	67
Figura 5.5 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para Santos. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.....	70
Figura 5.6 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para Santos. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.....	71
Figura 5.7 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para São Vicente. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.	72
Figura 5.8 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para São Vicente. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.....	73
Figura 5.9 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para Bertioga. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.....	74
Figura 5.10 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para Bertioga. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.....	75
Figura 6.1 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1876; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.	80
Figura 6.2 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1969; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.	81
Figura 6.3 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1975; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.	82
Figura 6.4 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1989; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.	83
Figura 6.5 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1876 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	85
Figura 6.6 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1876 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	86

Figura 6.7 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1969 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	87
Figura 6.8 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia vazante)-Cenário 1969 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	88
Figura 6.9 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1969 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	89
Figura 6.10 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1969 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	90
Figura 6.11 Campo de velocidade média (m/s) durante de maré sizígia (enchente)-Cenário 1975 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	91
Figura 6.12 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1975 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	92
Figura 6.13 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1975 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	93
Figura 6.14 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1975 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	94
Figura 6.15 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1989 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	95
Figura 6.16 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1989 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	96
Figura 6.17 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1989 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	97
Figura 6.18 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1989 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	98
Figura 6.19 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 2014 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	99

Figura 6.20 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 2014 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.	100
Figura 6.21 Distribuição da salinidade ao longo de um perfil longitudinal na coluna de água durante um instante de maré enchente de sizígia (29/06 às 18hrs) para o canal de Santos (desembocadura até o estuário acima) para os cenários com vazão normal: (A) 1876, (B) 1969, (C) 1975, (D) 1989 e (E) 2014.	102
Figura 6.22 Distribuição da salinidade ao longo de um perfil longitudinal na coluna de água durante um instante de maré enchente de sizígia (29/06 às 18hrs) para o canal de Santos (desembocadura até o estuário acima) para os cenários com vazão adicional: (A) 1969 , (B) 1975, (C) 1989.....	103
Figura 6.23 Nível médio do mar (A) e parâmetro de estratificação para (B) Santos, (C) São Vicente e (D) Bertioga com a vazão normal, para os cenários de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014.	106
Figura 6.24 Nível médio do mar (A) e parâmetro de estratificação para (B) Santos, (C) São Vicente e (D) Bertioga com a vazão adicional, para os cenários de 1969, 1975, 1989.....	107
Figura 6.25 Descarga cumulativa ($m^3 \times 10^8$) para os cenários de 1876 a 2014 com a vazão normal para a secção em Santos, São Vicente e Bertioga.....	108
Figura 6.26 Descarga cumulativa ($m^3 \times 10^8$) para os cenários de 1969, 1975 e 1989 com a vazão adicional para a seção em Santos, São Vicente e Bertioga.....	109
Figura 6.27 Descarga cumulativa ($m^3 \times 10^8$) comparativa para os cenários de 1876 a 2014 com a vazão normal para a seção em (A) Santos, (B) São Vicente e (C) Bertioga.	110
Figura 6.28 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Santos. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal.....	112
Figura 6.29 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de São Vicente. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal.....	112
Figura 6.30 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Bertioga. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal.	113

Figura 6.31	Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Santos. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal e vazão adicional.	113
Figura 6.32	Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de São Vicente. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal dos cenários com a vazão normal e adicional.....	114
Figura 6.33	Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Bertioga. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional. retrato.....	114
Figura 6.34	Localização dos pontos para os parâmetros de maré e de estratificação para os três canais de Santos, São Vicente e Bertioga.	116
Figura 6.35	Constituinte de maré M2 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.	117
Figura 6.36	Constituinte de maré M4 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.	118
Figura 6.37	Raio de amplitude M4/M2 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.	119
Figura 6.38	Fase relativa (FR) ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.	120
Figura 6.39	Número de forma (F) ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São	

Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estatística descritiva dos anos com levantamento disponível, extraída do método de interpolação “ <i>Topo to Raster</i> ”	37
Tabela 2 Diferença morfológica máxima e mínima (m) entre levantamentos batimétricos.	44
Tabela 3 Dados de profundidades e volume de área do canal definida entre os perfis 1 e 6 do (canal do porto de Santos)	55
Tabela 4 Localização das estações de ADCP fundeadas na área de estudo	58
Tabela 5 Constantes harmônicas geradas a partir de dados de elevação do ADCP para Santos, São Vicente e Bertioga.	62
Tabela 6 Fator de forma, fase relativa, e raio de amplitude para Santos, São Vicente e Bertioga	63
Tabela 7 Qualificação do RMAE e ARMAE (WALSTRA et al., 2001)	68
Tabela 8 Parâmetros estatísticos ARMAE das componentes de fundo e superfície U e V e elevação do mar para Santos, São Vicente e Bertioga.	69
Tabela 9 Resultados da descarga cumulativa para as seções transversais de Santos, São Vicente e Bertioga para o período de 10/06 a 30/06.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SES – Sistema estuarino de Santos

ADCP/PACD – Acoustic Doppler current profiler ou perfilador acústico de correntes por efeito Doppler

CT – Conductivity and Temperature profiler ou perfilador de condutividade e temperatura

MW – Megawatt

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change/Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução geral.....	1
1.2 Justificativa da pesquisa	3
1.3 Hipótese	4
1.4 Objetivos.....	5
1.5 Estrutura da tese.....	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1.1 Circulação e estratificação de estuários.....	10
2.1.2 Marés em estuários	13
2.1.3 Modelagem de estuários	15
CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO.....	18
3.1 Sistema estuarino de Santos (SES).....	20
3.2 Características meteorológicas e oceanográficas	20
3.3 Características geomorfológicas e estruturais	21
3.4 Características geológicas.....	23
3.5 Histórico da ocupação urbano-industrial	24
3.5.1 Instalação do Porto de Santos	25
3.5.2 Usina Henry Borden	25
3.6 Trabalhos anteriores relevantes no SES	27
CAPÍTULO 4 - EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO SES	29
4.1 Introdução	29
4.2 Material e Métodos	29
4.3 Resultados e discussão	37
4.3.1 Evolução batimétrica	37
4.3.2 Variação batimétrica temporal.....	44
4.3.3 Perfis morfológicos do canal do Porto de Santos	53
4.3.4 Variação volumétrica do canal do porto de Santos	54
4.4 Conclusões.....	55

CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.57

5.1 Introdução.....	57
5.2 Material e métodos	58
5.2.1 Dados disponíveis para a modelagem	58
5.2.2 Tratamento dos dados disponíveis.....	61
5.3 Implementação do modelo.....	63
5.3.1 Descrição do modelo	63
5.4 Resultados da validação do modelo.....	66
5.5 Conclusões.....	75

CAPÍTULO 6 - EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO SES E SUAS

IMPLICAÇÕES NOS PROCESSOS ESTUARINOS77

6.1 Introdução.....	77
6.2 Material e Métodos.....	78
6.3 Resultados e discussão	79
6.3.1 Resultados das simulações	79
6.3.2 Comparações entre os cenários e suas implicações nos processos estuarinos	101
6.3.2.1 Distribuição longitudinal de salinidade no canal do porto de Santos.....	101
6.3.2.2 Parâmetros de estratificação	104
6.3.2.3 Descargas cumulativas	107
6.3.2.4 Velocidade média da corrente	111
6.3.2.5 Análise de maré	115
6.4 Conclusões.....	122

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES FINAIS.....124

7.1 Conclusões gerais	124
7.2 Trabalhos Futuros	129

REFERÊNCIAS131

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução geral

Os estuários são sistemas complexos nos quais os processos geológicos, hidrodinâmicos, geoquímicos e biológicos interligados e a interação entre a bacia fluvial e a zona costeira são modulados por vários mecanismos controladores (DYER, 1997). As áreas estuarinas têm sido intensamente estudadas, por um lado, pela importância de seus serviços ecossistêmicos para as populações humanas que vivem às margens e, por outro, devido ao crescente impacto antrópico que pode aumentar a vulnerabilidade local (DAI et al., 2013; IGLESIAS et al., 2019).

Os estuários também são fronteiras entre ambientes de água salgada e doce. São zonas atrativas, altamente diversas biologicamente e fisicamente, que proporcionam abrigo à navegação e uma diversidade de atividades humanas. São tipicamente centros de população, comércio, indústria e recreação. Consequentemente são também locais para despejo de rejeitos industriais, urbanos, e da agricultura (CHENG; CASULLI; GARTNER, 1993).

Os estuários, deltas e baías semi-fechadas estão entre os ambientes mais vulneráveis às mudanças climáticas. Alterações nos níveis do mar, nas taxas pluviométricas e no campo de ventos são possíveis impactos causados pelas mudanças climáticas (MOLLER et al., 2001), que podem alterar a salinidade, a turbidez e o aporte de sedimentos destes ambientes (TOLDO JR et al., 2006), e causar impactos socioeconômicos e ambientais.

A habilidade de compreender e prever o comportamento de ambientes costeiros é essencial para o gerenciamento de zonas costeiras, para se compreender os processos como dispersão de poluentes, transporte de sedimentos e erosão em áreas costeiras.

Um importante parâmetro que regula o sistema estuarino é a morfologia. A compreensão da evolução morfodinâmica estuarina e os mecanismos que governam as

mudanças morfodinâmicas são de grande importância para iniciativas e medidas de gerenciamento costeiro-estuarino.

É às margens de estuários que se desenvolvem algumas das maiores áreas metropolitanas do mundo. A cidade de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América, está localizada no extenso estuário do Rio Hudson. Apesar de não configurar entre os maiores estuários da Terra, o Sistema Estuarino de Santos (SES), está localizada contiguamente à maior região metropolitana da América do Sul, à cidade de São Paulo, qualificando o SES como um importante ambiente estuarino do Brasil.

O SES tem um papel importante em nível regional e nacional, como sua importância ecológica e potencial biológico (CESAR et al., 2006). Por concentrar diversos usos e funções econômicas e sociais, como o turismo, recreação, indústrias, agricultura, áreas urbanas e sobretudo seu porto, surge a necessidade de uma caracterização completa dessa área. O SES é um exemplo de estuário densamente urbanizado, e está situado no litoral do Estado de São Paulo, onde está atualmente o maior porto da América Latina, o Porto de Santos. A instalação do porto foi um dos fatores primordiais de desenvolvimento urbano na região. O Porto de Santos foi criado em 1531 por Brás Cubas, época em que a intervenção das embarcações nos canais era mínima. As obras de expansão e dragagem dos canais se iniciaram mais tarde, em 1891 e no ano seguinte, em 1892 o porto foi inaugurado oficialmente (ZUNDT, 2006). Além do porto, a região abriga um pólo energético, petroquímico, siderúrgico e industrial de grande porte no município de Cubatão e um complexo de Usinas Hidrelétricas que operou de 1926 a 1992, fornecendo energia elétrica para a região e para a cidade e o estado de São Paulo.

Com os avanços nas ciências da computação, os modelos numéricos tornaram-se um recurso indispensável para compreender a dinâmica estuarina (GEORGE, GELFENBAUM e STEVENS, 2012a). A implementação e aplicação de ferramentas que representem as características hidrodinâmicas e morfológicas é fundamental para o fornecimento de informações relevantes aos tomadores de decisões e responsáveis pela segurança das populações e recursos ecológicos da região, visto que futuras intervenções devem se respaldar no conhecimento dos padrões hidrodinâmicos e morfológicos do SES.

Neste contexto, foi implementado um modelo numérico para o SES, utilizando o modelo numérico DELFT 3D, com o objetivo de representar a hidrodinâmica do estuário em conjunto com uma análise da evolução morfológica ao longo dos anos, com base em dados batimétricos pretéritos de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014.

A disponibilidade de dados batimétricos históricos permitiu uma comparação quantitativa do regime hidrodinâmico através de aplicação de um modelo numérico para configurações batimétricas pretéritas. Devido à escassez de dados históricos observados sobre os processos físicos para análise direta na região, o modelo numérico e a análise de dados batimétricos se mostraram ser ferramentas adequadas para se examinar a evolução morfológica e suas implicações nos processos estuarinos do SES. Ademais é o primeiro estudo na região que aborda os efeitos da evolução morfológica nos processos estuarinos.

1.2 Justificativa da pesquisa

A interação detalhada e a influência quantitativa dos processos responsáveis pela mudança morfológica no SES não são totalmente compreendidas nem comprovadas. A tarefa de descrever e investigar a complexa interação dos processos hidrodinâmicos e morfológicos atuantes e em constante mudança na região (marés, correntes, ondas, vazões de rios, gradientes de salinidade) é de vital importância para o entendimento do estuário.

O SES possui alguns pontos relevantes, dentre eles:

- Zona portuária (Porto de Santos), o qual é um pólo de desenvolvimento socioeconômico, com elevada densidade populacional dependente dos estuários para serviços ecossistêmicos. A região serve de conexão entre continente e oceano, necessitando de entendimento em conjunto e propostas de manejo integrado continente /oceânico;
- Zona com impacto de desenvolvimento urbano (canal) que modificou o padrão circulação oceânica. Além disso, durante os anos de 1920 a 1992 funcionava a usina Henry Borden que retirava a água da represa Billings para geração de energia em Santos. Essa água era despejada no rio Cubatão. Entre 1950 e 1992 o bombeamento das águas pela usina funcionou sem restrição, com uma vazão média oscilando entre 74 e 131 m³/s (SAMPAIO, 2010). Não há estudos sobre os impactos desta vazão adicional, e se houveram alterações nos processos estuarinos;

- Zona com alta incidência e crescente suscetibilidade a extremos climáticos (tempestades, aumento do nível do mar, comprometimento de infraestrutura urbana, culturas agrícolas e população;
- Zona costeira com proximidade de montanhas com relevo acidentado, as quais atuam como amortecedores de tempestades, ventos e ondas. altamente poluído (Cubatão), pouco estudado em relação a sua importância.

O desenvolvimento do canal do porto de Santos como resultado da influência antropogênica da construção do porto é o principal fator de mudança costeira de todo o SES. Os modelos numéricos baseados em processos são cada vez mais utilizados para simular, descrever e entender o comportamento dos sistemas costeiros. Portanto, a aplicação de um modelo numérico DELFT3D baseados em processos contribui para a melhor compreensão da morfodinâmica e a hidrodinâmica do local a ser investigado.

A avaliação das mudanças morfológicas históricas no SES a partir da modelagem numérica baseada em processos e a análise da evolução da morfologia através de dados batimétricos pretéritos podem fornecer uma visão valiosa dos processos estuarinos e respostas às mudanças morfológicas do SES. O estudo da evolução da circulação e da morfodinâmica do SES é essencial para a compreensão dos problemas relacionados ao transporte de poluentes, processos de transporte de sedimentos e erosão, e impactos no ambiente de diversas espécies que dependem do SES. A compreensão do comportamento morfodinâmico pode, em última análise, apoiar as decisões de gerenciamento (eg: colocação de material de dragagem, planejamento espacial da infraestrutura costeira, dragagem de manutenção, preservação de espécies, dentre outras), além de refinar as questões científicas.

1.3 Hipótese

A hipótese do trabalho é que em decorrência das mudanças morfológicas desencadeadas pelo aprofundamento do canal de Santos, através das obras de dragagem que ocorreram ao longo das últimas décadas, a dinâmica estuarina do Sistema Estuarina de Santos-Bertioga-São Vicente sofreu alterações em função de seu ajuste à nova morfologia. Assim, são esperadas alterações temporais em características da coluna de água, como a estratificação no canal

dragado, assim como alterações no transporte residual nos diferentes canais que compõem o sistema estuarino de Santos.

1.4 Objetivos

Trabalhos anteriores abordaram questões relacionadas à dinâmica e qualidade das águas do SES, por outro lado, esse trabalho apresenta uma abordagem inédita sobre a evolução da dinâmica do SES frente às mudanças morfológicas que ocorreram devido as dragagens no canal do porto. O objetivo deste estudo é investigar a evolução morfológica e hidrodinâmica do SES levando-se em conta os aspectos de sua urbanização ao longo dos anos, desde antes da construção do porto de Santos até os dias de hoje (1876 a 2014), com base na aplicação e análise do modelo numérico DELFT 3D. Desta forma, diferentes cenários (anos) são simulados e analisados, com o objetivo de responder às seguintes questões específicas:

1. Houve alterações significativas na hidrodinâmica e na morfologia do SES antes e depois da construção do porto/dragagem do canal do porto?
2. Houve alterações na morfologia estuarina após as dragagens do canal do porto de Santos?
3. Quais são os impactos da dragagem do canal do porto de Santos na estratificação e intrusão salina?
4. Houve alterações no comportamento das marés do estuário devido às mudanças na morfologia ao longo dos anos?
5. Houve alterações no comportamento no transporte de águas do estuário devido às mudanças na morfologia ao longo dos anos?
6. Houve alterações significativas nos processos estuarinos do SES durante o período de operação da Usina Hidrelétrica Henry Borden (vazão adicional no Rio Cubatão)?
7. Quais as implicações e impactos nos processos estuarinos devido às alterações na morfologia do estuário?

1.5 Estrutura da tese

Este documento está dividido em sete capítulos. Após a parte introdutória, que contextualiza e define os objetivos do trabalho (Capítulo 1), é apresentada a revisão da literatura (Capítulo 2), abordando o estado da arte relacionada aos principais tópicos do trabalho. No Capítulo 3 é apresentada uma descrição da área de estudo, foco do trabalho. O Capítulo 4, aborda a evolução morfológica do SES a partir das informações batimétricas disponíveis; o Capítulo 5 aborda a aplicação, calibração e validação do modelo numérico computacional na região de estudo para o ano de 2014 (modelagem hidrodinâmica tridimensional do SES); e o Capítulo 6 apresenta os resultados das simulações da modelagem do SES para quatro cenários morfológicos históricos (1876, 1969, 1975 e 1989), permitindo a avaliação dos processos estuarinos como consequência da evolução morfológica do estuário (Figura 1.1). O Capítulo 7 encerra o documento com as conclusões gerais do trabalho.

Figura 1.1 Fluxograma esquemático da estrutura e dos métodos do trabalho.

Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURA

A maior parte das costas ao redor do globo são interrompidas por canais que as conectam aos oceanos, a estuários, lagunas e rios. Costas que margeiam canais são áreas muito dinâmicas e podem ser erodidas ou acrescidas muito mais rapidamente em relação às costas mais distantes de canais. Esses tipos de costa, que são adjacentes a canais, são áreas muito dinâmicas e de contínuas mudanças pois estão sob influência de processos oceânicos (como aumento do nível do mar, ondas, e correntes de marés) e terrestres (como chuvas e descargas de rios). A combinação desses processos no sistema, as variações causadas pelas mudanças climáticas e a intensa urbanização dessas regiões, as tornaram extremamente vulneráveis (RANASINGHE et al., 2012)

Um estuário pode ser definido de diversas maneiras dependendo do ponto de vista. A definição mais satisfatória seria provavelmente a adaptação da clássica de (PRITCHARD, 1967) “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensurável e diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

Os estuários são sistemas complexos nos quais os processos geológicos, hidrodinâmicos, geoquímicos e biológicos e a interação entre a bacia de drenagem e a zona costeira são modulados por vários mecanismos de forçamento. Os principais fatores hidrodinâmicos nesses sistemas de transição são: tensão de cisalhamento do vento, ondas, marés, entrada de água doce, gradientes de temperatura e salinidade e trocas com a atmosfera. A importância relativa das forçantes dependerá, no entanto, das características únicas de cada estuário e dos ecossistemas associados. Os estuários apresentam uma forte relação entre morfodinâmica e hidrodinâmica. A morfologia estuarina é controlada principalmente por condições hidrodinâmicas, mas também pelo suprimento de sedimentos, pelos processos de sedimentação e pela geologia do sistema estuarino. As atividades humanas nos rios e em suas bacias hidrográficas alteram o tempo, a magnitude e a natureza dos insumos materiais para os estuários. Essas mudanças podem desencadear

fenômenos de erosão e assoreamento com consequências para as populações e os ecossistemas, que podem ser agravados por episódios de contaminação, eventos extremos e efeitos de mudanças climáticas.

Alteração na vazão fluvial que chega à costa, seja esta alteração consequência de ação antrópica ou natural, irá impactar de alguma forma na sua morfologia. Se houver uma redução da vazão fluvial que chega à costa, por exemplo quando os fluxos de descarga das cheias são reduzidos para segurança da população, pode ocorrer a penetração de água salgada para dentro do estuário. Isso faz com que os sedimentos do mar, transportados por correntes de maré, permaneçam no interior do estuário devido à falta de correntes fortes, aumentando a disponibilidade de sedimento no estuário e consequentemente diminuindo sua profundidade. Alguns exemplos desta influência em grandes bacias são as águas do Rio da Prata, ricas em minerais e organismos, se deslocam para o Norte (junto a costa do Rio Grande do Sul) e as águas do Rio Amazonas que transportam grandes quantidades de sedimentos para áreas costeiras adjacentes (IGLESIAS et al., 2019; NEVES; MUEHE, 2008).

As atividades antrópicas também têm impactos na evolução das regiões estuarinas. Muitos estuários têm sido modificados nas últimas décadas e séculos, com o intuito de permitir que navios cada vez maiores possam acessar através de canais. As áreas mais abrigadas estuários acima através de canais. Processos externos atuando na morfologia do sistema, como dragagem, para extração de agregados ou para manutenção de canais de navegação e modificação de margens (canais artificiais, marinas, quebra-mares, estradas, pontes, rampas para barcos etc.) podem alterar os padrões hidrodinâmicos e alterar completamente o equilíbrio dos ecossistemas. Essas intervenções como aprofundamento e retificação do canal, frequentemente levam a uma combinação de amplificação de maré, aumentando a circulação do estuário, e a assimetria de maré com predomínio de enchente (WINTERWERP; WANG, 2013).

Os estuários são importantes ambientes deposicionais. São complexos e possivelmente fazem parte de um agrupamento ambiental único, uma vez que representam uma unidade em que se formam espaços deposicionais através de processos geológicos, principalmente por erosão fluvial, e cujo preenchimento desse espaço é obtido por uma série de outros processos de sedimentação, tais como fluvial, estuarino e marinho. Os sedimentos estuarinos têm origem tanto fluvial quanto marinha, pois comumente ocupam a porção mais próxima do mar de um vale afogado, cujas fácies

sedimentares são influenciadas pelas marés, ondas e processos fluviais (WALKER, 2011).

Os estuários são classificados em quatro tipos de acordo com suas características geomorfológicas: a) planície costeira, b) fiordes, c) formados por barras, e d) os outros que não se enquadram nessa classificação (TRUJILLO; THURMAN, 2017, DYER, 1997). Os estuários de planície de maré foram formados como resultado do aumento do nível do mar no Pleistoceno, com início há ~20mil anos atrás. Estes estuários que eram originalmente rios, se formaram durante inundações durante milhares de anos devido ao aumento do nível do mar. Sua forma se assemelha aos rios atuais e geralmente são largos (na ordem de alguns quilômetros) e rasos (na ordem de 10m), com grande raio de proporção largura/profundidade. (VALLE-LEVINSON, 2010). O SES é um exemplo de estuário de planície de maré.

Os estuários também podem ser divididos, em dois tipos principais, baseado no poder relativo dos processos das ondas e marés: em estuários dominadas por ondas; e estuários dominados por maré (BOYD et al, 2006). Nos estuários dominados por ondas, as ondas são significativas na desembocadura, onde o sedimento é erodido da linha de costa e é transportado ao longo da costa para formar um banco. Já nos estuários dominados por marés, como resultado das correntes de marés relativas aos efeitos de ondas, a área da desembocadura geralmente contém bancos de areia aos quais são alinhados com o fluxo da corrente, e em torno do qual o sedimento circula. Na cabeceira do estuário a influência da maré diminui e o fluxo do rio se torna dominante.

A compreensão dos processos físicos que governam a hidrodinâmica e morfologia de ambientes costeiros é essencial para o gerenciamento de recursos e esforços de recuperação. Os estuários estão constantemente se adaptando às mudanças de forças externas (por exemplo, aumento de nível do mar e obras de engenharia). Dalrymple et al, (1992) e Williams; Orr; Garrity, (2002) constataram que a hidrodinâmica de um estuário é controlada em grande parte pela batimetria do ambiente. Por exemplo, a localização e a profundidade das características morfológicas, isto é, a morfologia dos canais, os bancos e as planícies de maré e suas posições, têm um efeito substancial sobre a magnitude e a direção de ondas e das correntes. A variação espacial e temporal da circulação e o transporte de sedimentos podem causar convergências que depositam sedimentos em zonas inativas e alteram a elevação da superfície do fundo. Áreas de alta velocidade também podem ser mantidas como condutores primários para sedimentos para outras regiões do estuário (GEORGE; GELFENBAUM; STEVENS, 2012b).

2.1.1 Circulação e estratificação de estuários

De acordo com Trujillo e Thurman (2017), a maioria dos estuários podem ser classificados como de planície costeira, no entanto dentro deste grande grupo principal existem muitas diferenças, como padrões de circulação, estratificação e processos de mistura. Desta forma, uma melhor classificação seria baseada na distribuição da salinidade e das características dos fluxos dos estuários.

Os estuários, portanto, podem ser classificados de acordo com as suas características de estratificação e de distribuição da salinidade. São distribuídos em quatro tipos de estuários: estuário verticalmente misturado, estuário levemente estratificado, estuários altamente estratificados e estuário tipo cunha salina (TRUJILLO; THURMAN, 2017; VALLE-LEVINSON, 2010), (Figura 2.1).

O estuário tipo cunha salina é o mais estratificado ou o menos misturado de todos. Eles ocorrem quando um rio rapidamente deságua no oceano, onde as correntes de maré são fracas. Ou seja, o fluxo do rio que é o fator determinante nesses tipos. Como a água doce é menos densa que a água do mar, ela fica acima da água salgada. O estuário altamente estratificado é um estuário fundo no qual a salinidade da camada superior aumenta da cabeceira para a desembocadura, chegando a valores de salinidade próximo ao do oceano aberto. A água da camada profunda tem uma salinidade uniforme de oceano aberto em qualquer profundidade ao longo de todo estuário. O padrão de circulação neste tipo de estuário é bem desenvolvido. A mistura na interface da água superior e inferior cria um movimento líquido da massa de águas profundas para a água na superfície. Nos estuários levemente estratificados ou parcialmente misturados, as águas doce e salgada se misturam em todas as profundidades, no entanto as camadas do fundo se mantem mais salgadas que as camadas da superfície. A salinidade é maior na desembocadura e vai diminuindo em direção ao estuário acima, a montante. Os estuários verticalmente misturados ocorrem quando a descarga do rio é baixa e as correntes de maré predominam. A salinidade da água neste tipo de estuário é a mesma na superfície e no fundo. As fortes correntes de maré eliminam as camadas de água doce que ficam na superfície acima das águas mais densas e salgadas.

Figura 2.1 Classificação dos estuários de acordo com as características de mistura (adaptado de Thurman 2017).

Na maior parte dos estuários a circulação depende essencialmente da interação de três fatores: a amplitude da maré, a vazão dos rios e a relação entre a largura e a profundidade do estuário. Dependendo da importância de cada um destes fatores, podemos reconhecer vários tipos de circulação nos estuários, aos quais correspondem determinados padrões de distribuição vertical da salinidade e de circulação.

A classificação criada por Hansen e Rattray (1966) é uma forma quantitativa de classificar e comparar os estuários, requerendo apenas medidas de salinidade e velocidade. Usa-se dois parâmetros adimensionais, o parâmetro de circulação e de estratificação, descritos a seguir:

(1) parâmetro de estratificação ($\Delta S / \langle S_0 \rangle$): quociente entre a diferença da salinidade do fundo e da superfície, e a salinidade média na seção transversal. O crescimento deste parâmetro significa um aumento da estratificação vertical.

(2) parâmetros de circulação (U_s / U_f): quociente entre a média da velocidade vertical e a média da velocidade de superfície. O crescimento deste parâmetro significa um aumento da circulação longitudinal.

Nos estuários do tipo 1, o fluxo segue em direção ao oceano em todas as profundidades. Os estuários do tipo 1a têm uma pequena estratificação e são lateralmente homogêneos e bem misturados. O tipo 1b não possui estratificação, nem fluxo de fundo em direção ao continente. Os estuários do tipo 2 incluem os parcialmente misturados e são divididos em bem misturado (2a) e parcialmente estratificado (2b). Os estuários do tipo 2 são caracterizados por uma circulação gravitacional bem desenvolvida e transporte longitudinal

por advecção e difusão turbulenta. O estuário de tipo 3 é caracterizado por estuários com forte circulação gravitacional e estratificação de média a intensa. Por último, os estuários do tipo 4 são fortemente estratificados sem circulação gravitacional, do tipo cunha salina (Figura 2.2).

Figura 2.2 Diagrama de estratificação e circulação de (HANSEN; RATTRAY, 1966).

A diferença de densidade entre água doce e salgada faz dos estuários um ambiente interessante. A circulação da água e o processo da mistura nos estuários são conduzidos pela diferença de densidade e a interação entre água doce e salgada. Embora haja apenas uma diferença de densidade de cerca de 2% entre a água doce e salgada, esta é suficiente para criar gradientes de pressão horizontal que afetam o fluxo. O gradiente de salinidade é um parâmetro espacial em relação as proporções de água doce e salgada ao longo da transição entre o rio e o oceano e salgada. A densidade da água salgada depende tanto da salinidade como da temperatura, mas nos estuários a variação de salinidade é maior e a variação de temperatura é geralmente menor. Nesses ambientes, a temperatura tem relativamente uma influência pequena na densidade (DYER, 1997).

Quando a água do rio encontra a água dos oceanos, a água doce menos densa sobe e fica acima da água salgada, mais densa. A água salgada entra no estuário abaixo da água do rio, forçando sua passagem rio acima ao longo do fundo.

A circulação, os processos de mistura e estratificação de salinidade no estuário dependem de sua geometria (limitando a dimensão desses corpos de água), da descarga

de água doce, da maré, da salinidade, da circulação da região oceânica adjacente e do vento que atua na região (PRITCHARD, 1967).

Os principais fatores que determinam a distribuição do sal são segundo Perrels; Karelse (1978): o movimento da maré dentro do estuário (governado pela variação da elevação da maré), a descarga de água doce, a diferença de densidade entre água doce e água salina do mar, a geometria do canal, a influência do vento (local e remoto), efeito de Coriolis e o gradiente de pressão entre oceano e estuário.

2.1.2 Marés em estuários

As oscilações do nível do mar são controladas pela atração astronômica da Lua e do Sol sobre as águas do oceano. As ondas de maré geradas por estes processos são significativamente modificadas pela geomorfologia das margens continentais e em ambientes costeiros ela se propaga como onda de águas rasas. Portanto, a batimetria é a variável que determina a velocidade de onda de maré. A onda de maré quando se propaga estuário adentro, em áreas costeiras e baías, pode ser substancialmente deformada, tornando sua assimetria mais evidente. Ao se propagar estuário acima, a onda de maré passa a apresentar oscilações devido a topografia local, bloqueio da propagação devido a vazão fluvial, e dissipação de energia devido ao atrito nas margens e no fundo do estuário, resultando em mudanças nas velocidades da corrente das marés e duração.

De acordo com a classificação de Davis (1964), o contexto da maré que ocorre no estuário tem sido descrito em termos de variação de maré, de modo que ambientes com variação de maré menor que 2 m são denominados micromaré, com variação entre 2 e 4 m, são denominados de mesomaré, e com variações maiores que 4 m macromaré. Atualmente é usado o termo hipermaré para variações maiores que 6 m.

A interação entre a morfologia do estuário e a propagação das marés influencia diretamente nas variações na altura de maré e na intensidade das correntes. Em ambientes costeiros dominados por marés, a maré exerce grande influência na definição das características geomorfológicas. As marés são principal mecanismo para importar sal, sedimentos, nutrientes e outras substâncias do oceano adjacente para os estuários (IGLESIAS et al., 2019).

A morfologia estuarina é, em grande parte, determinada pelo padrão residual de transporte de sedimentos e vice-versa. O transporte residual de sedimentos depende de

diferenças de magnitude e duração entre as correntes de maré de enchente e vazante. Tais diferenças ("assimetria das marés") são produzidas pela distorção da onda de maré que se propaga na plataforma costeira e entra em baías e estuários.

A assimetria pode ser definida como a distorção entre a componente lunar dominante semi-diurna M2 e as componentes de maré de águas rasas com frequência maior que semi-diurna, como a componente M4. A M4 é a componente principal de águas rasas, responsável pelas distorções de ondas de maré e assimetria de maré em ambientes de águas rasas.

A assimetria ocorre quando a subida e descida de maré (enchente e vazante) têm durações diferentes, apresentando velocidades máximas diferentes. Esta assimetria eventualmente ao longo de um ciclo de maré gera um transporte de sedimentos, com correntes de enchente resultando em um transporte de sedimentos estuário acima ou sob condições de vazante o transporte em direção ao oceano prevalece, resultando em uma exportação de sedimentos para fora do estuário.

Segundo a análise de Viles; French (1999), a maré move uma quantidade de água para dentro e para fora a cada ciclo de maré. Os estuários que têm marés de enchente mais curtas e, portanto, marés de enchente de maior energia, são conhecidos como dominado por enchentes. Os estuários que têm marés mais curtas, e de maior energia, e marés de vazante, são conhecidos como dominados por vazante. Se a maré de enchente e vazante tem diferentes durações, o volume fixo de água da maré de menor duração tem que se mover mais rápido que a de maior. Isto significa que se a maré de enchente leva 3,5 horas e a de vazante leva 7,5; o estuário tem que encher em 3,5 horas e esvaziar em 7,5 horas. A única maneira de isso ser alcançado é através das variações de velocidade e, portanto, de energia. Se na situação acima, os períodos de enchente são menores, e a energia é maior, mais sedimentos podem ser levados na maré de enchente que na maré de vazante (assumindo que o suprimento de sedimentos é adequado). Desta forma, o estuário passará por um acréscimo de sedimentos. Esse transporte final de sedimentos também é modificado por outros fatores, como correntes residuais, mecanismo de transporte de transporte de sedimentos (carga de leitos ou suspensão), estabilidade de sedimentos e armadilha de sedimentos. Desta forma, as informações sobre assimetria da maré podem ser muito úteis para se determinar os padrões das correntes, e a dominância de maré de enchente ou vazante, além de ser fator determinante nos processos de transporte e deposição de sedimentos (IGLESIAS et al., 2019; MIRANDA et al., 2017).

Em significativas variações de maré nos estuários, o volume de água entre a maré alta e baixa, definido como prisma de maré, é maior quando comparado com o volume de baixa maré. A interação entre a propagação da onda de maré no estuário e a morfologia do estuário leva a importantes variações no alcance da maré e a força das correntes de maré. Convergência nos lados dos estuários causa uma compressão lateral da onda de maré, e na ausência de fricção, a conservação de energia requer que a variação da maré aumente. A fricção que ocorre em águas rasas pode causar uma diminuição na variação da maré. Dependendo das condições desses processos, os estuários podem ser classificados de três modos (NICHOLS; BIGGS, 1985):

Estuário hipsíncrono: A convergência excede a fricção. Como consequência, a variação da maré e as correntes de maré aumentam em direção a cabeceira do estuário, até que na secção do rio, convergência diminui, a fricção se torna o maior efeito e maré reduz. Esses estuários geralmente têm forma afunilada.

Estuário síncrono: A fricção e a convergência têm efeitos iguais e efeitos opostos na maré, a variação é constante ao longo do estuário até onde a seção do rio é alcançada.

Estuário hiposíncrono: A fricção excede os efeitos de convergência e a variação de maré diminui em direção a cabeceira do estuário. Esses estuários tendem a ser restritos nas desembocaduras, com a água entrando e se espalhando no interior do estuário. As maiores velocidades ocorrem nas desembocaduras.

2.1.3 Modelagem de estuários

Os primeiros modelos tridimensionais foram desenvolvidos na década de 1960 como o intuito de criar modelos acoplados para atmosfera-oceano para estudar o clima mundial. Na década seguinte, começou o desenvolvimento dos modelos tridimensionais para superfície livre em estuários e regiões costeiras. Não existe um modelo multiuso, que possa ser usado para todos os casos, pois há uma grande variedade de canais de desembocaduras. Desta forma serão classificados a seguir alguns tipos de modelos segundo DE VRIEND, (1996):

- Modelos baseados em dados: faz o uso de dados medidos apenas, e objetiva diretamente o fenômeno a ser descrito.
- Relações empíricas: também é baseado em observações, estabelecendo uma relação entre entrada e saída do sistema.

- Modelos baseados em processos: descrevem ondas, correntes, transporte de sedimentos, e mudanças de nível de fundo através de um conjunto de equações matemáticas baseadas primeiro em princípios físicos (conservação de massa, momento, energia e outros).
- Modelos de longa duração: derivados de um modelo baseado em processos por uma integração oficial através do tempo (e espaço) com relações empíricas e paramétricas.
- Semi-empírico: modelos de longo termo; descreve a dinâmica de interação entre grandes elementos do sistema, usando relações empíricas para representar os efeitos de processos de pequena escala.

A complexidade e a escala de alcance do comportamento dos ambientes são particularmente difíceis de modelar, o que leva a seguinte classificação (DE VRIEND, 1996) (1) fenômenos de microescala (escala de processos), que ocorrem em escalas menores que o comportamento morfodinâmico correspondente (ex. processos como ondas, correntes, e transporte de sedimentos); (2) fenômenos de mesoescala (escala dinâmica) que se concentra no comportamento morfodinâmico mais “primário” devido às interações dos processos constituintes e topografia de fundo (ex. formação de dunas e bancos de areia, migração natural de canais naturais e mudanças morfológicas devidas a obras humanas); e (3) fenômenos de macroescala (escala de tendências), que se refere a lentas tendências em escalas bem maiores que as aquelas do comportamento morfodinâmico mais “primário”. Essas tendências podem ser devidas a efeitos seculares no comportamento inerente do sistema ou à mudanças graduais na forçante extrínseca ou nos parâmetros do sistema (ex. evolução do padrão do canal na bacia e no delta, evolução da zona de intermaré)

A habilidade de se compreender e prever o comportamento de ambientes costeiros é muito importante para o gerenciamento de zonas costeiras. Devido às grandes variabilidades espaciais e temporais de salinidade, marés, correntes de marés que existem, inúmeras observações de campo devem ser feitas para que se possa definir as características hidrodinâmicas de um estuário. Os custos associados com a coleta de dados são normalmente muito altos. Uma possível solução para a falta de dados de campo é o uso de modelos numéricos como técnicas sofisticadas para interpolação e exploração de dados de campo em domínios espaciais e temporais. O modelo numérico deve ser ajustado e comparado com dados de campo disponíveis (calibração), e que se apresente

satisfatoriamente de forma a reproduzir independentemente os grupos de dados observados (verificação). Desta forma o modelo pode ser usado como uma ferramenta de pesquisa para investigação de processos hidrodinâmicos de estuários (CHENG et al, 1993).

Os modelos numéricos são atrativos em função da sua flexibilidade e devido à complexidade dos sistemas estuarinos. É relativamente recente que os canais de desembocaduras passaram a ser modelados. Tornou-se possível modelar muitos dos complexos processos físicos como ondas, correntes, transporte de sedimento, e mudanças morfológicas. Desta forma, a modelagem numérica se torna uma ferramenta importante para a investigação da morfologia costeira histórica, atual e futura. Consequentemente, modelos numéricos de alta resolução tornaram-se cada vez mais relevantes como ferramentas de apoio à tomada de decisões para uma gestão marinha e costeira eficaz e integrada. Modelos numéricos são essenciais para uma avaliação adequada dos processos dinâmicos do sistema estuarino. As soluções numéricas fornecem uma compreensão das características hidrodinâmicas de ambientes costeiros complexos, representando adequadamente os padrões hidrodinâmicos estuarinos associados a alterações morfológicas. Embora a caracterização básica das regiões estuarinas seja geralmente realizada por meio de medições in situ, geralmente há uma falta de observações contínuas e de longo prazo. Através do uso de modelos numéricos de alta resolução, é possível superar a falta de observações in situ e caracterizar o comportamento real dessas regiões, fornecendo informações valiosas para promover a segurança da população e a sustentabilidade de seus ecossistemas e serviços ecossistêmicos (IGLESIAS et al., 2019).

Capítulo 3

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o Sistema Estuarino de Santos (SES), localizado no litoral centro-sul do Estado de São Paulo na altura do Trópico de Capricórnio (Figura 3.1). A área está inserida na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), que compreende os municípios de Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos e São Vicente. A RMBS possui uma área de 2.423 km² e uma área de drenagem que atinge 2.887 km². Os principais rios da bacia que compreende a RMBS são: Cubatão, Mogi e Quilombo na área central; Itapanhaú, Itatinga e Guaratuba ao norte; Itanhaém, Branco e Preto ao sul. Os municípios litorâneos formam uma faixa de 162 quilômetros de praias entre Peruíbe e Bertioga e têm, em seu território, cerca de 120 km² de manguezais ainda preservados. O SES compreende três principais canais estuarinos, chamados de Santos (canal do porto), São Vicente, e Bertioga, que são interconectados. O SES compreende aproximadamente 48% do total da área de drenagem que compõe a bacia da RMBS, totalizando 1.387 km² de área de drenagem. Ele ainda pode ser dividido em duas unidades: a principal (a sul), com área de 987 km² e composta pelos rios Cubatão, Mogi e Quilombo, cuja conexão com o oceano ocorre pelos canais de Santos e São Vicente; e a secundária (a norte), com área de drenagem igual à 400 km², composta pelos rios Itapanhaú e Itatinga, cuja conexão com o oceano ocorre pelo canal de Bertioga. Essa divisão é enfatizada devido a conexão existente no estuário, que conecta os três canais mencionados e as duas bacias.

Figura 3.1 Mapa de localização da área do Estuário de Santos com suas principais características: canais de acesso; via de acesso de Santos (porto), via de acesso de São Vicente e via de acesso de Bertioga e os pontos de coleta de dados (ADCP/CT); SA-Santos, SV-São Vicente e BE-Bertioga, e Usina Henry Borden.

3.1 Sistema estuarino de Santos (SES)

O Sistema Estuarino de Santos compreende a área de planície da Baixada Santista que recebe os rios afluentes que drenam a Serra do Mar. O sistema estuarino possui um padrão intrínseco de canais de maré e pequenos rios provenientes das elevações pré-cambrianas próximas que se intercomunicam na região acima do sistema (SUGUIO; MARTIN, 1978; AB´SABER, 1965, ALMEIDA, 1953). O SES se distingue por comportar um dos maiores portos da América Latina, desempenhando um importante papel no cenário econômico nacional. A principal bacia hidrográfica da região é a do rio Itapanhaú, que se conecta com o estuário através de um canal de 24 km, entre o Canal de Bertioga e o porto de Santos. Os três principais canais de conexão com o mar são o canal de Santos, Bertioga e São Vicente. O SES recebe contribuição de sedimentos de origem continental e marinha. No canal portuário o sedimento dominante é o silte (FULFARO; PONÇANO, 1976; PONÇANO, 1985) e argila com elevadas quantidades de matéria orgânica (FUKOMOTO et al., 2004).

3.2 Características meteorológicas e oceanográficas

O clima da região da Baixada Santista enquadra-se em duas classificações, de acordo com o sistema internacional de Köppen: AF = clima tropical úmido, sem estação seca definida, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 18°C (classificação que domina todo o litoral de São Paulo); e a CFA = clima mesotérmico sem estiagem, sendo que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C (SILVA, VAZ-DOS-SANTOS & MARACINI, 2012). A região apresenta um dos maiores índices pluviométricos do país, com alta variabilidade anual, de 2000 a 2500 mm.

Este litoral da região é dominado por ondas de alturas médias em torno de 1 metro provenientes do quadrante nordeste (NE), leste (E), sudeste (SE), sul (S), sudoeste (SW). As marés na região são semi-diurnas e as marés astronômicas são de micro-marés, não passando 1,5 m; com amplitudes médias de 0,27 m durante a quadratura e 1,23 m durante

a sizígia. O sistema estudado é predominantemente governado pela atuação das marés mista semidiurna (BAPTISTELLI, 2008; CASSIANO; RIBEIRO; YASSUDA, 2012; HARARI; CAMARGO, 1995).

3.3 Características geomorfológicas e estruturais

A Província Costeira, definida por Almeida (2018), corresponde “à área do Estado drenada diretamente para o mar, constituindo o rebordo do Planalto Atlântico. É, em maior parte, uma região serrana contínua, que à beira-mar cede lugar a uma sequência de planícies de origens variadas”.

O litoral centro-sul do estado de São Paulo está inserido no contexto da Província Costeira e é marcado pela presença da Serra do Mar, uma região de serras e escarpas abruptas que separa de forma natural a zona costeira estreita da planície sedimentar litorânea. A região é dominada pela extensa estrutura regional, denominada Falha Cubatão. Esta falha transcorrente de direção geral NE (N50° a N70°) condiciona o relevo da região e define a direção da escarpa da Serra do Mar, que separa o Planalto Atlântico Paulista, a noroeste, da Planície Litorânea, a sudeste.

Almeida, (1953) cita o nome genérico Serra do Mar para um sistema de escarpas e montanhas que, desde o norte do Estado de Santa Catarina até o Estado do Rio de Janeiro, limita a borda oceânica do Planalto Atlântico. Na região serrana, as escarpas mostram-se abruptas e festonadas, desenvolvendo-se ao longo de anfiteatros sucessivos, separados por espigões. Para compor o desnível da ordem de 800 a 1.200 m, entre as bordas do Planalto Atlântico e a Baixada Litorânea, a faixa de escarpas apresenta, em planta, larguras de 3 a 5 km, em média (IPT, 1981). Diante da cidade de Santos, esse relevo atinge altitudes superiores a 1200 m, também chamado, localmente, de serra de Cubatão. Os grandes desníveis foram gerados por acidentes tectônicos, falhamentos ou fortes flexuras.

Segundo o IPT (1981), o relevo na Serra do Mar é caracterizado pelas seguintes unidades:

- Escarpas festonadas: anfiteatros separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos, que possuem drenagem de alta densidade, padrão sub-paralelo a dendrítico e vales fechados;

- Escarpas com espigões digitados: compostas por grandes espigões lineares subparalelos, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos, que possuem drenagem de alta densidade, padrão paralelo-pinulado, vales fechados.

Na planície litorânea o relevo é caracterizado por:

- Morros: topos arredondados, vertentes ravinadas de perfis convexos a retilíneos, com drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico e vales fechados, ocorrendo de forma isolada nas planícies costeiras;
- Terraços marinhos: terrenos planos, poucos metros acima das planícies costeiras, com drenagem superficial ausente. Presença de antigos cordões de praias e dunas;
- Planícies aluviais: representadas pelos sedimentos aluviais e respectivas planícies fluviais dos principais rios da baixada;
- Mangues: terrenos baixos, quase horizontais, no nível de oscilação das marés, caracterizados por sedimentos tipo vasa (lama) com vegetação típica e drenagem com padrão difuso;
- Planícies costeiras: terrenos baixos e mais ou menos planos, próximos ao nível do mar, com baixa densidade de drenagem, padrão meandrante, localmente anastomosado. Como formas subordinadas ocorrem cordões (praias, dunas etc.).

A área de estudo possui poucos, mas extensos rios que nascem na Serra do Mar. Como a região da baixada apresenta baixo relevo, próximo ao nível do mar, a drenagem é de baixa densidade, com padrão meandrante. A topografia e a entrada de material continental são os principais fatores que controlam as características sedimentares da região, enquanto a deposição sedimentar resulta da combinação da hidrodinâmica continental e marinha (LACERDA; MARINS, 2006). A influência continental é dada pela descarga e erosão de uma ampla rede de rios, e pode ser caracterizada por fácies terrígenas. Por outro lado, a entrada de terrígenos é controlada por correntes de marés e erosão da plataforma continental; sedimentos são retrabalhados e transportados ao longo da costa, variando gradualmente de silte a areia (FUKUMOTO; MAHIQUES; TESSLER, 2004).

3.4 Características geológicas

Os dados sobre geologia são de fundamental importância para a modelagem hidrodinâmica do estuário, pois apresentam relação direta com os aquíferos existentes.

O substrato geológico da região é composto por grande variedade litológica, agrupada em dois grandes grupos com características distintas (IPT, 1981):

1. As rochas do embasamento cristalino, representadas por litotipos metamórficos e ígneos de idade arqueira a neoproterozóica; e
2. Os depósitos sedimentares da planície costeira, representada pelos sedimentos inconsolidados de idade cenozóica.

A planície de Santos, incluindo a baía e o estuário, é formada predominantemente por areias marinhas, depósitos argilo-arenosos, fluvio-lagunares e sedimentos de fundo de baía com desenvolvimento pronunciado de manguezais (TESSLER, 1994). Ponçano (1985) efetuou a subdivisão dos terrenos da baixada santista em três grandes grupos, de acordo com a natureza de depósitos detríticos:

- Depósitos de Mangue: correspondem a sedimentos argilosos e siltosos, com abundantes restos orgânicos e localmente capeados por lençóis descontínuos e rasos de areias marinhas;
- Aluviões e coluviões: aluviões atuais e sub-atuais (terraços), arenosos em superfície com lentes de argila e cascalho, imaturos, por vezes, passando a depósitos coluvionares finos;
- Depósitos marinhos antigos: correspondem a antigas praias e sedimentos de mar raso da Formação Cananéia e terraços marinhos pós-glaciais, arenosos, maduros, com concentrações de conchas.

Os sedimentos de fundo do estuário são predominantemente constituídos por silte fino gradacionado até areia muito fina, não se registrando em geral, tendência de assoreamento rápido (FULFARO & PONÇANO, 1976). Os bancos de lama ou lodo são ambientes de grande importância no ecossistema manguezal. Estes bancos são formados pela deposição de sedimentos finos em áreas abrigadas de correntes. Geralmente ocorrem onde rios chegam ao mar e perdem velocidade, depositando o material que carregam ao longo das margens de rios e canais (OLMOS & SILVA, 2003).

As formações geológicas cenozóicas são resultantes da evolução de fases tectônicas combinadas com variações do nível relativo do mar e flutuações climáticas

regionais. Na evolução geológica mais recente (cenozoico) os principais eventos podem ser resumidos na formação do relevo, devido à presença de um clima tropical úmido, à invasão marinha e à deposição de sequências sedimentares associadas, representadas pela Formação Cananeia (Pleistoceno) e pelos demais depósitos continentais aluvionares, coluvionares, marinhos e mistos indiferenciados (Holoceno) (SUGUIO; MARTIN, 1978).

3.5 Histórico da ocupação urbano-industrial

A partir da metade do século XIX houve um desenvolvimento da ocupação das regiões adjacentes aos estuários ao longo da costa brasileira, alterando assim de forma gradativa a geometria e as condições das bacias de drenagem dos rios e as características estuarinas.

A indústria de base juntamente com atividades portuárias é a base econômica da região. Existem atualmente 24 indústrias na região de Cubatão e terminais como Alemoa, Ilha de Barnabé e o Terminal Marítimo Privativo de Cubatão. Por esses terminais circulam produtos químicos e derivados de petróleo. A área possui extensa malha de dutos que cortam terrenos de alta declividade na Serra do Mar, extensas áreas de manguezal, áreas urbanas e industriais e instalações portuárias. Essas indústrias atraíram elevado contingente de mão-de-obra de outras regiões do país o que causou sérios problemas sócio ambientais. A procura de habitações próximas ao local de trabalho e a falta de recursos para a aquisição de moradias pela população mais pobre, leva à ocupação de terras inaptas à construção ou próximo a áreas industriais. A ocupação ilegal ocorre em terrenos pouco valorizados ou públicos, às margens de rodovias ou ferrovias, nas escarpas ou em regiões de manguezais (e.g., Vila dos Pescadores) (GUTBERLET, 1996).

Ademais, importantes obras de infraestrutura estão relacionadas ao desenvolvimento da região, tais como: a Estrada de Ferro São Paulo Railway (1876), a Estrada Velha Caminho do Mar (1922), a Usina Energética Henry Borden (1926), a Rodovia Anchieta (1947), a Refinaria de Petróleo Presidente Bernardes (1955) e a Cia. Siderúrgica Paulista – COSIPA (1953), ambas em Cubatão.

3.5.1 Instalação do Porto de Santos

O Porto de Santos foi criado em 1532 por Braz Cubas, em uma época que a atracação dos barcos nas margens dos canais da região era pouco intensa e as embarcações eram pequenas. Desta forma, não era necessária nenhuma intervenção nos canais do estuário. As primeiras obras de expansão do porto foram iniciadas em 1891, estendendo-se até 1909. Nesse período o cais não tinha mais do que 70 m de extensão (ZUNDT, 2006). Desde então o canal do porto tem sido dragado. Em 2010, o processo de expansão (aprofundamento) do canal foi iniciado com término em janeiro de 2012. O trabalho de dois anos envolveu a dragagem e a retirada de duas grandes rochas na lateral do canal. O canal foi dragado em toda sua extensão, sendo aprofundado de 12 m para 15 m (FONTES; SCHLOESSER, 2012)

Atualmente, o Porto de Santos possui 12 km de extensão e é operado pela CODESP (Companhia Docas do Estado de São Paulo), movimentando mais de 60 milhões de toneladas de cargas diversas por ano.

3.5.2 Usina Henry Borden

O complexo das usinas hidrelétricas Henry Borden fica localizada no sopé da serra do mar, em Cubatão Figura 3.2. Ela foi projetada pelo engenheiro americano Asa White Kenney Billings e Henry Borden. O complexo possui duas usinas de aproximadamente 728m de queda, uma externa e outra subterrânea, ambas de alta eficiência energética sendo que 1 m³/s turbinado gera 5,654MW (RAGNEV, 2005). A vazão máxima da usina é de 157 m³/s e a capacidade de produção energética da usina é de 889MW, suficiente para abastecer uma cidade de 2 milhões de habitantes. Entre 1950 e 1992 o bombeamento das águas pela usina funcionou sem restrição, com uma vazão média oscilando entre 74 e 131 m³/s (SAMPAIO, 2010). A partir de 1992 o bombeamento das águas do Rio Pinheiros para o Reservatório Billings é permitido apenas para controle de cheias.

Figura 3.2 Esquema da região da Usina Henry (EMAE, 2016)

As obras das usinas no SES tiveram início em 1925 e primeira unidade começou a operar em 1926. A finalidade da usina era de abastecimento de energia para a cidade de Cubatão. No final das décadas de 1920 e 1930, a usina era alimentada por um reservatório artificial criado por Billings, gerando energia para a usina externa. Na década de 40, o Rio Pinheiros teve seu curso invertido e esse passou a desaguar na represa Billings. Anteriormente, o rio Pinheiros, que nasce originalmente na Billings, cruzava a cidade de São Paulo, desaguardo no rio Tietê. Para esta conversão, um sistema de comportas foi construído na confluência dos Rios Tietê e Pinheiros, destinado a controlar a passagem das águas. O objetivo era de aumentar o volume de água armazenado na represa Billings e consequentemente a capacidade de geração de energia para a cidade de Cubatão. Além da geração de energia, a importação de água do Sistema Billings servia para atendimento às indústrias de Cubatão, e parte escoava para o Rio Cubatão.

Desde outubro de 1992, a operação desse sistema vem atendendo às condições estabelecidas na Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, de 04/10/92, atualizada pela Resolução SMA-SSE-02, de 19/02/2010, que só permite o bombeamento das águas do Rio Pinheiros para o Reservatório Billings para controle de cheias, reduzindo em aproximadamente 75% a energia produzida em Henry Borden (em torno de 108MW).

De acordo com o relatório da Hidroconsult de 1975 (BAPTISTELLI, 2008) a vazão média da usina era de $90 \text{ m}^3/\text{s}$. Atualmente, a disponibilidade hídrica para a geração hidrelétrica varia entre 15 a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (média). Conforme a Resolução nº 453 de 1998 –

ANEEL, a energia assegurada da Usina Henry Borden é de 108 MW em média, o que corresponde a uma vazão média turbinada da ordem de $19,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.6 Trabalhos anteriores relevantes no SES

Apesar do SES e seu porto ser uma das regiões mais estudadas da costa brasileira, o conhecimento atual na região ainda é incipiente, dada sua grande importância. O SES acomoda um dos maiores e mais importantes portos da América Latina.

Diversos trabalhos realizaram estudos de modelagem na região, com objetivo de simular o transporte de sedimento, e prever correntes e componentes de marés. Não foi encontrado, no entanto, nenhum estudo da evolução do estuário com a abordagem nos efeitos da morfologia e hidrodinâmica nos processos estuarinos. A seguir seguem alguns estudos considerados relevantes para a região do SES.

Yassuda (1991) estudou o transporte de sedimentos para condições típicas de quadratura e sizígia no canal principal do SES através da implementação de um modelo numérico bidimensional acoplado a um modelo de transporte de sedimentos e a um modelo para a advecção - difusão dos sedimentos em suspensão. Este estudo demonstrou que padrões realistas de transporte de sedimentos em sistemas estuarinos podem ser obtidos utilizando-se modelos numéricos simples acoplados a equações de transporte empíricas sem a necessidade da aquisição de um extenso volume de dados de corrente e sedimentos.

Harari; Camargo, (1994) apresentam a simulação dos principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira, da Ponta do Vigia (SC) a Cabo Frio (RJ), através do processamento de um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional. Os mapas de amplitude e fase de maré obtidos mostram as áreas de amplificação e de atenuação para as ondas de maré, e seus sentidos de propagação. Também é possível através dos resultados das simulações, prever as elevações e as correntes de maré, em qualquer local desta área, e para qualquer período.

Harari; Camargo, (1998) realizaram simulações de maré através da implementação do modelo Princeton Ocean Model (POM) para a região costeira de Santos. Destacam-se como resultados: o contraste das intensidades das circulações, entre a parte mais profunda e regiões internas rasas; as marcantes diferenças de intensidade de

correntes nos dois lados da Baía de Santos; a convergência/divergência das correntes nos Canais de São Vicente e de Bertiooga; assimetrias de maré nas regiões rasas; e rotação anti-horária das correntes na área costeira.

Baptistelli (2008) aborda a dispersão de efluentes no ambiente marinho através da modelagem numérica hidrodinâmica (MIKE 21 HD, POM e Delft3D) na região do Sistema Estuarino de Santos/São Vicente. O estudo apresentou as diferenças na utilização dos modelos numéricos hidrodinâmicos e discutiu as características e limitações teóricas e práticas existentes para cada um dos três modelos utilizados.

Chambel; Mateus (2008) descrevem os principais processos que impulsionam a hidrodinâmica do estuário de Santos (SP, Brasil) e aplicam um modelo hidrodinâmico na região (MOHID). O modelo empregado utilizou uma grade pouco refinada com o objetivo de otimizar o tempo das simulações e realizar cenários diferentes, no entanto a grade pouco refinada não representa em detalhes alguns padrões de circulação dentro dos canais do estuário, as simulações perderam a representatividade do sistema em detalhes.

Sampaio (2010) buscou avaliar o grau e a extensão da contaminação das águas, com um uso de um indicador biológico de qualidade de água (*Escherichia coli*) no Sistema Estuarino de Santos-São Vicente por esgotos domésticos, através da aplicação da modelagem numérica (MOHID). Os resultados de modelagem demonstraram baixa qualidade microbiológica das águas estuarinas e queda da balneabilidade das águas em todo o SES durante em marés de sizígia.

Souza (2012) fez uma caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista utilizando a modelagem numérica através do software MIKE 21, onde se criou um modelo que representasse o canal do porto de Santos.

Fiedler (2015) estuda os possíveis efeitos de um aumento do nível do mar no padrão de correntes no Sistema Estuarino de Santos (SP), através do uso do modelo hidrodinâmico do Delft3D-FLOW, considerando diferentes taxas de aumento do nível do mar de acordo com o quinto relatório do IPCC (AR5). Os resultados indicam alteração na velocidade da corrente no estuário, mais evidente durante a sizígia.

Roversi (2016) apresenta um estudo da hidrodinâmica do Sistema Estuarino de Santos com a implementação de um modelo (SisBaHiA®), com foco na análise de renovação das águas. Os resultados indicam que após 30 dias praticamente toda água do estuário é renovada.

Capítulo 4

EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO SES

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma descrição da evolução morfológica do SES realizada através da comparação de cinco cartas náuticas disponíveis para a região. As análises das cartas náuticas permitiram a avaliação quantitativa da evolução do SES ao longo dos anos de 1876 a 2014.

Os modelos de elevação digital (DEM) são uma representação tridimensional da superfície de um terreno, comumente usadas em sistemas de informações geográficas (SIG). Os DEM derivados de batimetrias digitalizadas têm se tornado uma ferramenta muito útil para se estudar as mudanças morfológicas em estuários (eg. THOMAS; SPEARMAN; TURNBULL, (2002), BLOTT et al., (2006), DAI; LIU; WEN, (2015).

4.2 Material e Métodos

Um levantamento de dados foi realizado para se obter informações históricas da região estudada. Neste trabalho foram coletados dados batimétricos do SES desde 1876 até 2014. A descrição da evolução morfológica do SES foi feita através da comparação de dados batimétricos do SES. Foram utilizadas cartas náuticas que compreendem um período que se entende desde antes da construção do porto (1876), os anos de 1969, 1975 e 1989 e um levantamento mais recente de 2014. Os dados batimétricos vieram das seguintes cartas náuticas/levantamento:

- 1876: A carta náutica de 1876, anterior à instalação do Porto foi utilizada para levantamento mais antigo, fornecida pelo Arquivo Estadual de São Paulo. A carta náutica consiste em um dos levantamentos feitos na Carta da América do Sul –

Costa Leste do Brasil, Porto de Santos. Levantada pelo Capitão E. Mouchez, Marinha do Império Francês, 1876;

- 1969: após a construção do porto e início das dragagens do canal de Piaçagüera. Carta náutica da DHN nº 1701 (da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil, para o respectivo ano;
- 1975: dragagem de todo o canal de Santos até o canal de Piaçagüera. Carta náutica da DHN nº 1701 (da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil, para o respectivo ano;
- 1989: dragagem do canal de Piaçagüera e parte do canal de Santos. Carta náutica da DHN nº 1701 (Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil, para o respectivo ano;
- 2014: levantamento batimétrico mais recente. As informações referentes à batimetria da região para o ano de 2014 foram extraídas dos seguintes documentos cartográficos:
 - cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil): Carta Náutica nº 1710 e nº 23100;
 - levantamentos batimétricos efetuados pela Codesp (Companhia Docas do Estado de São Paulo);
 - dados medidos em campo pelo Laboratório de Dinâmica Costeira do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo em 2014.

As cartas náuticas de 1876, 1969, 1975 e 1989 abrangem a porção estuarina. Desta forma a batimetria na porção oceânica foi complementada com as batimetrias mais recentes (levantamentos e cartas náuticas de 2014).

Inicialmente, todas as cartas náuticas foram digitalizadas para se obter um mapa batimétrico contínuo. Para isso, foi utilizado um método de interpolação que melhor estimasse os valores de batimetria onde não há pontos amostrais. Os resultados da análise de interpolação foram utilizados para a avaliação da evolução morfológica. Desta forma foram realizadas as seguintes etapas:

1) Processamento dos dados batimétricos:

As cartas náuticas dos anos de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014 foram digitalizadas e georreferenciadas em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) para extração de dados batimétricos (ponto amostral com coordenada geográfica e respectiva medida de profundidade) nela contidos.

Os mapas com as localizações dos pontos batimétricos das cartas náuticas originais anos de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014 são apresentados na Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4.

Na carta de 1969 o canal de Piaçagüera foi dragado a uma profundidade de 10 m e largura de 60 m, sendo demarcado por um balizamento cego em toda sua extensão, situado aproximadamente a 80 m do eixo do canal. A dragagem tem como seu limite superior o fim do canal de Piaçagüera e seu limite inferior próximo à Ilha de Barnabé. A carta náutica de 1975 teve o canal de acesso ao porto de Santos até o canal de Piaçagüera dragados. A dragagem foi dividida em quatro seções, variando de 14 m (canal de acesso ao porto de Santos) a 10m (canal de Piaçagüera). Já a carta de 1989 teve o canal de Piaçagüera dragado (mesmos limites da carta de 1969) em 10 a 12 m e no canal de acesso ao porto de Santos a uma profundidade de 13 m.

Figura 4.1 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1876. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos.

Figura 4.2 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1969. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos.

Figura 4.3 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1975. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos.

Figura 4.4 Mapa de localização dos pontos de batimetria da carta náutica do ano de 1989. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos.

Figura 4.5 Mapa de localização dos pontos de batimetria (e topografia para pontos em terra) da carta náutica do ano de 2014. (A) batimetria geral do estuário e (B) área do canal do porto de Santos

2) Interpolação dos dados batimétricos:

Nesta etapa foram gerados mapas batimétricos contínuos de toda área do estuário por meio da interpolação dos dados de profundidade. O software utilizado para aquisição e apresentação dos dados foi o ESRI® ArcGIS 10.3, e o método de interpolação utilizado foi “*Topo to Raster*”, o qual melhor estima os valores de profundidade onde não há pontos amostrais. A interpolação espacial é o processo de tirar medidas em um grupo de pontos e prever o valor em todos os lugares entre os pontos medidos. Uma vez que não é muito prático coletar dados em todos os pontos possíveis, localizações individuais (amostras) são medidas, e interpolações são usadas para preencher as lacunas entre os pontos medidos. Enquanto a acurácia de Modelos Digitais de Elevação (DEM) são primariamente determinados pela qualidade das medições de profundidade, a baixa resolução espacial de levantamentos batimétricos mais antigos em específico necessita de métodos de interpolação mais adequados para se estimar áreas com profundidades desconhecidas. Consequentemente, a acurácia da modelagem de processos costeiros também é parcialmente dependente da acurácia do método de interpolação que desenvolve a representação contínua do fundo oceânico.

Além do uso de batimetria, o método de interpolação *Topo to Raster* permite o uso de arquivos de curvas de nível e máscaras com delimitações de rios ou lagos, contorno

de penhascos e bacias de drenagem. Neste trabalho foi criada uma máscara que exclui toda a região terrestre emersa da região estuarina, diminuindo assim, possíveis erros (profundidades não existentes) durante o processo de interpolação. O arquivo de interpolação final é um arquivo de imagem que consiste em uma matriz de células, organizada em colunas e linhas, em que cada célula representa um valor de profundidade, chamado de Raster. A partir dos arquivos Raster de cada ano, foram realizadas algumas análises, descritas a seguir:

a. Variação batimétrica entre os canais

As diferenças morfológicas entre os levantamentos disponíveis foram realizadas com o objetivo de verificar os locais com maiores mudanças de profundidade ao longo da evolução morfológica do sistema. O software utilizado para o cálculo dos dados foi o ESRI® ArcGIS 10.3, através da ferramenta *Raster Math: Minus*. O cálculo foi feito a partir da subtração da profundidade do levantamento mais recente menos o levantamento mais antigo. Essa análise permitiu a avaliação da evolução batimétrica da área do estuário e as mudanças ocorridas entre os anos.

b. Perfis morfológicos

Com o objetivo de analisar com mais detalhe as variações de profundidade entre os diferentes levantamentos, foram definidos seis perfis transversais ao longo do canal de Santos (

Figura 4.6). Os perfis morfológicos foram feitos a partir dos arquivos Raster de cada ano. Foram traçados seis perfis com auxílio da ferramenta *3D Analyst – Interpolate Line*, no software ESRI® ArcGis10.3. Essa ferramenta permite a criação de um perfil batimétrico do local desejado.

Os perfis 1 a 6 foram dispostos de jusante à montante (da desembocadura até o estuário acima), com o perfil 1 localizado na desembocadura do canal e o perfil 6 localizado a norte do canal do porto de Santos, sendo este o mais próximo do terminal portuário. As linhas de variação da profundidade apresentadas nos perfis morfológicos (

Figura 4.6 Mapa de localização do polígono (área) do canal de Santos delimitado em cinza, tendo como seus limites inferior e superior os perfis 1 e 6 respectivamente.) são traçadas a partir da margem direita do canal, ou seja, a partir da Ilha de Santos. As

observações foram feitas a partir de montante (perfil 6), em direção a desembocadura do canal.

c. Cálculo do volume de água para o canal de Santos

O volume de água do canal de Santos foi calculado através da ferramenta *3D Analyst - Surface Difference*, no software ESRI® ArcGis10.3, que calcula o volume acima ou abaixo de um plano de referência, podendo se estabelecer as áreas que possuem deposição de sedimentos, erosão e áreas que não houve alteração na profundidade. O cálculo foi feito a partir da superfície até o fundo do leito do canal. O polígono (área) do canal de Santos usado no cálculo está representado na Figura 4.6.

Figura 4.6 Mapa de localização do polígono (área) do canal de Santos delimitado em cinza, tendo como seus limites inferior e superior os perfis 1 e 6 respectivamente.

4.3 Resultados e discussão

Os resultados estão dispostos nos seguintes itens: (4.3.1) interpolação batimétrica; que apresenta os mapas batimétricos interpolados de toda a área do estuário, para cada ano do levantamento, (4.3.2) variação batimétrica entre os cenários; que apresenta a variação batimétrica entre os cenários, sendo executada a subtração dos dados interpolados de dois cenários, com o objetivo de avaliar a evolução batimétrica de toda a área do estuário e as mudanças ocorridas entre os anos, (4.3.3) evolução morfológica do canal do porto de Santos; apresenta a evolução morfológica do canal do porto de Santos, que é o principal local onde é efetuada a dragagem para navegação e por último (4.3.4) a variação de volume de água no canal do Porto de Santos.

4.3.1 Evolução batimétrica

Os mapas batimétricos (Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.10) apresentam os dados batimétricos interpolados para todo o estuário e parte do oceano aberto e evidenciam variações batimétricas significativas ao longo do canal do Porto de Santos. Isso também é constatado pelos dados de estatística descritiva, obtidos após a interpolação dos dados (Tabela 1).

Tabela 1 Estatística descritiva dos anos com levantamento disponível, extraída do método de interpolação “*Topo to Raster*”.

	1876	1969	1975	1989	2014
Profundidade mínima (m)	-0.06	-0.10	-0.10	-0.10	4.77
Profundidade máxima (m)	-32.00	-29.00	-27.00	-26.00	-28.80
Profundidade média (m)	-11.50	-14.28	-14.00	-13.00	-14.40
Desvio padrão (m)	5.65	6.18	6.29	6.33	7.00

Observa-se que o levantamento de 1876 (Figura 4.7) é o único que possui os dados batimétricos que refletem as condições ambientais naturais do estuário. Os trabalhos de aprofundamento (dragagem) no canal de Santos se iniciam entre 1891-1909, mas a primeira carta disponível mostra esse processo é a carta de 1969 (Figura 4.8). Essa carta, no entanto, apresenta a dragagem executada apenas no canal de Piaçagüera, estuário acima. É a partir da carta de 1975 que esse processo se estabelece no canal do porto de Santos, seguindo até a porção oceânica. Isso é constatado nos levantamentos de 1975

(Figura 4.9) e 1989 (Figura 4.10), em que a profundidade ao longo do canal de Santos passou ter menores variações. Os padrões batimétricos dos levantamentos de 1975 e 1989 são parecidos tanto em relação às profundidades, quanto aos locais onde elas são encontradas (porção estuarina e oceânica), mesmo com os dados de 1989 mostrando que a região central do canal de Santos não sofreu aprofundamento. Nesses levantamentos a desembocadura do canal de Santos não apresentou profundidades maiores do que 20 m.

Nos levantamentos de 1876 (Figura 4.7) e 1969 (Figura 4.8) a desembocadura do canal de Santos apresentou profundidades superiores a 20 m, e também mais elevadas do que no restante do canal. A variação da profundidade no canal do porto de Santos era menor, justamente devido ao ambiente natural do estuário, que ainda não passava por processo de dragagem. A exceção ocorre em parte do levantamento de 1969, que mostra o canal de Piaçagüera com uma profundidade uniforme, devido ao processo de aprofundamento executado no local.

O levantamento batimétrico de 2014 (Figura 4.11) mostra uma uniformidade ainda maior na variação da profundidade ao longo de todo o canal em relação aos levantamentos de anos anteriores. Nesse, observa-se uma profundidade mais elevada na desembocadura do canal de Santos, perto de 30 m, diferentemente do observado nos levantamentos de 1975 e 1989 e igualmente observado nos levantamentos de 1876 e 1969.

Figura 4.7 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1876. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçaguera.

Figura 4.8 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1969. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçaguera.

Figura 4.9 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1975. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçaguera.

Figura 4.10 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 1989. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçaguera.

Figura 4.11 Mapa batimétrico gerado a partir da interpolação da batimetria (m) do levantamento do ano de 2014. (A) batimetria geral do estuário, (B) área do canal do porto e (C) canal de Piaçaguera.

4.3.2 Variação batimétrica temporal

As diferenças morfológicas entre os levantamentos disponíveis foram realizadas com o objetivo de verificar os locais com maiores mudanças de profundidade ao longo do estuário, principalmente na região do canal do Porto de Santos. O cálculo foi feito a partir da profundidade do primeiro ano menos o segundo, ou seja, subtraindo o levantamento mais recente menos o mais antigo. Esta análise permite a avaliação da evolução batimétrica da área do principal canal do SES e das mudanças ocorridas entre os levantamentos. Os mapas com as diferenças de batimetrias entre os anos de 2014-1876 (Figura 4.12), 2014-1969 (Figura 4.13), 2014-1975 (Figura 4.14), 2014-1989 (Figura 4.15), 1989-1975 (Figura 4.16), 1975-1876 (Figura 4.17) e 1969-1876 (Figura 4.18) evidenciam os locais que ficaram mais profundos (em azul) e mais rasos (em verde). A diferença morfológica máxima e mínima de profundidade entre os levantamentos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 Diferença morfológica máxima e mínima (m) entre levantamentos batimétricos.

Anos	Máximo (m)	Mínimo (m)
2014-1867	21.68	-18.80
2014-1969	21.30	-12.30
2014-1975	21.00	-14.70
2014-1989	20.00	-15.70
1989-1975	10.40	-13.20
1975-1969	17.00	-12.00
1969-1867	18.00	-21.70

Observa-se que as maiores diferenças morfológicas foram registradas entre os levantamentos de 2014 e os demais, com valores variando entre 20,00 e 21,68 m. Já as variações mínimas desses levantamentos mostram valores entre -12,30 e -18,80 m. Os valores negativos representam erosão (local mais fundo) e valores positivos representam assoreamento (locais mais rasos). A diferença morfológica entre o primeiro e último levantamento (2014-1876) apresenta a maior variação total, tanto mínima quanto máxima, refletindo claramente o estuário antropizado *versus* o natural. A considerável diminuição do diferencial mínimo entre 2014-1876 e 2014-1969, passando de -18,80 m para -12,30 m, reflete, possivelmente, o início do processo de dragagem no canal de

Piaçagüera. Já a relativa constância entre variações mínimas e máximas dos levantamentos de 2014-1975 e 2014-1989 refletem possivelmente o pleno processo de dragagem ao longo de todo o canal do porto de Santos.

Os demais comparativos apresentam menores variações mínimas e máximas, constatando que o processo de dragagem pré-2014 foi eficiente para minimizar o processo natural de erosão e assoreamento do canal, com exceção das variações observadas entre os levantamentos de 1969-1876, refletindo também o estuário alterado pelos processos de aprofundamento dos canais.

Figura 4.12 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 - 1876. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

Figura 4.13 Mapa de diferença de variação de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 - 1969. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

Figura 4.14 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014-1975. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

Figura 4.15 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 2014 -1989. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

Figura 4.16 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1989-1975. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

Figura 4.17 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1975 - 1969. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto

Figura 4.18 Mapa de diferença de batimetria gerada a partir da comparação das batimetrias dos anos de 1969 - 1876. (A) visão geral do estuário e (B) área do canal do porto.

4.3.3 Perfis morfológicos do canal do Porto de Santos

O perfil 6 (P6) mostra variações laterais e verticais do leito do canal ao longo dos anos. Observa-se o talvegue se deslocando da margem direita (1876) para a margem esquerda (1969) e depois para a zona central (1989 e 2014). A máxima profundidade do leito ocorre em 1876, com 32 m, e se estabiliza nos anos posteriores, em 22 m. O levantamento de 1975 não apresenta leito de canal definido ao longo do perfil e a profundidade máxima observada é de 12 m em praticamente todo o perfil batimétrico. O Perfil 5 (P5) mostra pouca variação lateral e vertical do leito, posicionado sempre na margem direita, com profundidade média de 18 m. O Perfil 4 (P4) também mostra pouca variação lateral e vertical. Nesse observa-se o aumento gradativo da profundidade do leito ao longo dos anos, passando dos naturais 10 m (1876 e 1969), para os 12 m (1975 e 1989) e 15 m (2014). Esse aumento ocorreu claramente em função do processo de aprofundamento do canal de Santos, observado a partir do levantamento de 1975. Os perfis 3 e 2 (P3 e P2) mostram similaridades nas variações laterais-verticais. Ambos mostram o leito do canal na margem esquerda, o levantamento de 1876 com a profundidade máxima, e uma diminuição da profundidade ao longo dos anos, passando dos 20 m, em 1876, para 13 m, em 1975. A exceção é constatada em 2014, que possui o leito mais profundo que os demais, com profundidade próxima ao do ano de 1876. O Perfil 1 (P1) mostra uma variação vertical expressiva do leito ativo do canal nos anos de 1969 e 2014 em relação aos anos de 1876, 1975 e 1989, com leito mais profundo naqueles levantamentos.

A análise morfológica sugere que o efeito do processo de dragagem ao longo do canal de Santos gerou modificações morfodinâmicas no SES. Nota-se uma diminuição da profundidade próximo à desembocadura do canal entre os anos de 1876 e 1989, constatado no P3. Para o ano de 2014 são encontradas profundidades elevadas (acima de 15 m) no P3, P2 e P1. No P2, observa-se o aumento das profundidades com o passar dos anos, possivelmente relacionado às dragagens cada vez mais profundas. Em todos os perfis, é notório que a morfologia do canal em 1876 reflete o ambiente mais natural possível. Em contraponto, os perfis do ano de 2014 evidenciam o processo de dragagem com o canal de Santos cada vez mais profundo.

Figura 4.19 Gráfico dos perfis morfológicos 1 a 6 localizados no canal de Santos, mostrando as mudanças existentes entre os anos dos levantamentos.

4.3.4 Variação volumétrica do canal do porto de Santos

A variação de volume em um estuário pode ser uma ferramenta simples para caracterizar o comportamento morfológico do estuário, como por exemplo, se está sofrendo erosão ou acresção. Um aumento do volume de um estuário representa uma diminuição do nível da bacia e menos sedimento disponível no estuário, já uma diminuição do volume no estuário indica sedimentação (THOMAS; SPEARMAN; TURNBULL, 2002). Os cálculos de volume dependem da acurácia das batimetrias utilizadas.

As tendências de volume foram calculadas em uma área selecionada do canal do porto de Santos (

Figura 4.6) que se estende do perfil 1 ao perfil 6 e têm como limites laterais as margens do canal. O cálculo foi feito a partir da superfície até o fundo do leito do canal (Tabela 3).

Tabela 3 Dados de profundidades e volume de área do canal definida entre os perfis 1 e 6 do (canal do porto de Santos)

	1876	1969	1975	1989	2014
Profundidade mínima (m)	-0.50	-1.00	-0.80	-0.22	1.38
Profundidade máxima (m)	-32.00	-24.40	-19.00	-25.23	-27.89
Profundidade média (m)	-9.80	-10.43	-11.15	-11.00	-13.20
Volume do canal (m³)	43.553.486	46.069.687	49.257.435	48.803.906	56.046.854

Como esperado, em função da evolução morfológica do canal, observa-se que os volumes totais sofreram um gradual aumento a partir de 1876 (43.553.486m³) em diante, sendo que no ano de 1975 (49.257.435m³) teve um aumento considerável de volume em relação aos anteriores e no ano de 1989 diminuiu levemente (48.803.906m³), aumentando novamente em 2014 (Figura 4.20).

Figura 4.20 Gráfico de evolução do volume de água (em metros cúbicos) do canal do porto de Santos ao longo dos anos de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014.

O volume do canal do porto do SES aumentou 12.493.368 m³ entre 1876 a 2014, representando um aumento na capacidade do estuário em torno de 28%. Este aumento do volume no canal de Santos indica um aprofundamento do leito do canal.

4.4 Conclusões

Através da composição de mapas, perfis batimétricos e análises de volumétricas, a evolução morfológica do SES foi quantificada e avaliada temporalmente entre os anos de 1876 a 2014.

O desenvolvimento da atividade de dragagem no canal do porto de Santos, iniciada ainda no século XIX (1891) para a construção do porto, e que, progressivamente, a partir do final da década de 1960, torna-se permanente e constante, modificou

significativamente a morfologia do principal canal do SES. Os levantamentos batimétricos de 1969, 1975 e 1989 evidenciam o aprofundamento do canal, o qual foi iniciado no canal de Piaçagüera, estuário acima, em 1969. Posteriormente, em 1975, a dragagem se estabeleceu ao longo de todo o canal, desde Piaçagüera, passando pelo porto e pelo canal de Santos, até mar afora.

Apesar de possuir menor área levantada e quantidade de pontos amostrais, pode-se afirmar que a morfologia do canal do porto de Santos do ano de 1876 é a que preserva as condições ambientais mais naturais do estuário. Essa constatação é corroborada pelos dados de variação morfológica, que reflete processos de erosão/aprofundamento (valores positivos) e assoreamento (valores negativos). Esses dados registram as maiores variações na comparação dos anos de 1969-1876 e 2014-1876, com valores ao redor de vinte metros, negativos e positivos, refletindo transformações relevantes na morfologia do canal atual. Ademais, os perfis morfológicos P3 e P4 também evidenciam morfologia e posição natural do leito do canal para o ano de 1876.

Com o passar dos anos e a necessidade de expansão do porto e consequentemente da navegação, o processo de dragagem do canal do porto de Santos fica mais evidente no ano de 2014, com a profundidade média ultrapassando 14 metros. As maiores diferenças morfológicas foram registradas entre os levantamentos de 2014 e os demais, com valores variando acima de 20 m positivos em todas as comparações. Os perfis morfológicos desse ano evidenciam o processo de dragagem com o canal cada vez mais profundo e amplo.

O volume do canal do porto do SES aumentou 12.493.368 m³ entre 1876 a 2014, representando um aumento na capacidade do estuário em torno de 28%. Este aumento do volume no canal de Santos indica um aprofundamento do leito do canal.

Através da análise morfológica, foi possível avaliar a evolução do estuário por efeito principalmente do processo de dragagens no canal, e definir os cenários morfológicos que serão simulados na avaliação das alterações dinâmicas do SES. No Capítulo 5 é apresentada a aplicação e validação do modelo numérico para a situação atual do estuário, e no Capítulo 6 o modelo numérico validado é aplicado aos diferentes cenários morfológicos, permitindo a avaliação da evolução da hidrodinâmica do SES.

Capítulo 5

APLICAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

5.1 Introdução

Estuários são regiões que envolvem processos e interações complexas, e apesar da caracterização dessas regiões serem feitas usualmente através de medições em campo, muitas vezes existe uma falta de observações contínuas e de longo prazo.

Através de modelos numéricos, aliado a medições em campo é possível suprir a falta de dados, tornando-se assim uma ferramenta para melhor compreensão destas complexas regiões, além de fornecer informações relevantes para tomadores de decisões. Os modelos numéricos podem prover uma melhor compreensão dos ambientes estuarinos e costeiros, assim como prever eventos extremos, intervenções antropogênicas ou mudanças climáticas e representar os padrões hidrodinâmicos dos estuários associados às mudanças morfológicas (IGLESIAS et al., 2019).

Para que um modelo numérico seja uma ferramenta válida, é preciso que o modelo seja calibrado e validado para os dados medidos. Esta etapa é alcançada quando se compara os dados de saída do modelo (como nível de maré e velocidade de correntes) com dados medidos em campo.

O modelo hidrodinâmico Delft3D (módulo FLOW) foi implementado para a avaliação de possíveis alterações nos processos estuarinos causados pelas mudanças morfológicas ao longo dos anos. O modelo foi calibrado para a situação morfológica recente (ano de 2014 – em função da disponibilidade de dados); e posteriormente aplicado para os anos anteriores de 1876, 1969, 1975 e 1989. Para estes cenários pretéritos o modelo foi implementado usando-se a mesma grade e parâmetros do ano de 2014, a única diferença nas simulações foram as batimetrias que foram extraídas de cartas náuticas dos respectivos anos. Além destes cinco cenários, outros três cenários foram simulados para os anos de 1969, 1975 e 1989, onde foi considerado também uma vazão média adicional ($100\text{m}^3/\text{s}$) para o Rio Cubatão, referente a vazão da Usina Henry Borden.

Neste capítulo são apresentados os resultados da calibração e validação do modelo para o ano de 2014, que possui levantamentos de campo disponíveis. A presente aplicação do modelo numérico é baseada na implementação e calibração do modelo de SEILER, (2019) e SEILER et al, (2019, submetido), com adequações e ajustes de acordo com as necessidades.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Dados disponíveis para a modelagem

Dados de nível, correntes, temperatura e salinidade

Com o intuito de se alcançar uma melhor compreensão da dinâmica do sistema estuarino estudado, foi usado um conjunto de dados oceanográficos (como elevação do nível do mar e correntes) através de perfiladores acústicos (ADCP – Aquadopp Current Profiler da Nortek de 1 e 2 MHz), fundeados nas entradas dos três canais: São Vicente, Santos e Bertioga. Estes equipamentos fizeram medições simultâneas, por um período de cerca de 25 dias (09/junho a 07/julho de 2014). Cada coleta consistiu em um ADCP próximo ao fundo e dois CT's (perfilador de condutividade e temperatura) posicionados junto ao fundo e a próximo da superfície, fornecendo dados de salinidade e temperatura. A localização dos três pontos de coleta é apresentada na Figura 3.1 e na Tabela 4.

Tabela 4 Localização das estações de ADCP fundeadas na área de estudo

Estação	Longitude	Latitude
ADCP São Vicente	46°23'42.52"W	23°58'52.50"S
ADCP Santos	46°17'20.86"W	23°59'13.01"S
ADCP Bertioga	46° 8'57.43"W	23°51'41.49"S

O ADCP coletou dados de direção e intensidade, com intervalo de amostragem de 30 minutos, e células de 0,5 m de profundidade. Com esta configuração, a zona sem dados junto ao fundo é de 0,4 m. A profundidade média local de fundeio dos ADCPs foi de 13,4 m no ponto de Santos, 3,57 m no canal de São Vicente e de 4,16 m no canal de Bertioga.

Dados vazão de rios

Para a estimativa das vazões fluviais na região de estudo foram utilizados dados do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de Dragagem de aprofundamento do canal de navegação, bacias de evolução e berços de atracação do Porto Organizado de Santos - São Paulo (CODESP, 2008). Neste relatório foram apresentadas as vazões mensais estimadas de 65 rios e córregos que fluem para o SES (Figura 5.1). A partir desses dados, muitos dos rios foram agrupados e suas vazões foram estimadas de acordo. A localização dos rios no modelo é apresentada na Figura 5.2.

Figura 5.1 Esquema da rede hidrográfica afluyente ao sistema (unidade m^3/s). Fonte: CODESP, 2008.

Figura 5.2 Localização dos pontos de vazão fluvial afluentes ao sistema.

Como entre 1950 e 1992 o bombeamento das águas pela usina Henry Borden funcionou sem restrição, com uma vazão média oscilando entre 74 e 131 m^3/s (SAMPAIO, 2010), foi escolhido o valor intermediário entre esses valores de $100\text{m}^3/\text{s}$. Essa vazão de $100\text{m}^3/\text{s}$, aqui chamada de vazão adicional, foi acrescida à vazão do Rio Cubatão durante as simulações nos cenários com a vazão adicional para os anos de 1969, 1976 e 1989.

5.2.2 Tratamento dos dados disponíveis

Caracterização de maré do SES

A partir da série temporal de elevação da superfície do mar dos dados coletados em 2014 pelo fundeio do ADCP, realizou-se uma análise harmônica de marés, através da aplicação do pacote de sub-rotinas *t_tide* no Matlab de PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, (2002). As constantes harmônicas obtidas para os três pontos de Santos, São Vicente e Bertioga podem ser visualizadas na Tabela 5 Constantes harmônicas geradas a

partir de dados de elevação do ADCP para Santos, São Vicente e Bertioga. As principais constantes harmônicas para as três regiões são as componentes diurnas M2 e S2. A partir destes resultados, o fator de forma, coeficientes de assimetria de maré (raio de amplitude e fase relativa) também foram determinados (Tabela 6).

Tabela 5 Constantes harmônicas geradas a partir de dados de elevação do ADCP para Santos, São Vicente e Bertioga.

Santos	amplitude (m)	fase (°)
MSF	0.081	186.55
*2Q1	0.012	43.19
*Q1	0.032	71.30
*O1	0.116	82.91
NO1	0.002	222.07
*K1	0.098	141.40
J1	0.001	24.44
OO1	0.008	273.54
UPS1	0.001	20.31
*N2	0.049	146.79
*M2	0.364	80.87
*S2	0.181	94.63
ETA2	0.010	87.38
*MO3	0.029	14.21
*M3	0.057	212.07
*MK3	0.039	133.10
*SK3	0.042	298.46
MN4	0.012	265.69
*M4	0.015	327.30
*MS4	0.015	134.12
S4	0.005	273.68
2MK5	0.006	346.93
2SK5	0.001	85.41
2MN6	0.005	106.47
M6	0.004	106.57
2MS6	0.005	114.44
2SM6	0.003	109.20
3MK7	0.001	167.54
M8	0.000	221.76

São Vicente	amplitude (m)	fase (°)
*MSF	0.157	193.44
*O1	0.1113	86.95
*K1	0.0995	140.73
*M2	0.3589	87.41
*S2	0.182	94.54
*M3	0.0613	217.51
SK3	0.0392	292.38
*M4	0.021	354.57
MS4	0.0094	103.61
S4	0.0076	236.41
2MK5	0.0044	358.48
2SK5	0.0042	238.08
M6	0.0029	104.2
*2MS6	0.0052	141.24
2SM6	0.0029	83.73
3MK7	0.002	129.45
M8	0.0026	216.05

Bertioga	amplitude (m)	fase (°)
*MSF	0.1459	184.3
*O1	0.1223	69.49
*K1	0.095	129.72
*M2	0.351	57.35
*S2	0.166	64.67
*M3	0.0498	176.91
SK3	0.0296	248.16
*M4	0.0298	301.36
*MS4	0.0156	52.51
S4	0.0033	208.48
*2MK5	0.0074	341.17
2SK5	0.0027	167.23
*M6	0.0059	17.51
*2MS6	0.0072	43.44
2SM6	0.0036	46.37
3MK7	0.0007	206.19
M8	0.0028	61.99

O fator de forma é determinado pela fórmula abaixo (DIAS; VALENTIM; SOUSA, 2013):

$$F = \frac{O1 + K1}{M2 + S2}$$

Onde O1, K1, M2 e S2 são amplitudes em metros dos constituintes correspondentes. A maré é semidiurna se $0 < F < 0.25$; maré mista com predomínio de maré semidiurna, se $0.25 < F < 1.5$, maré mista com predomínio de maré diurna se $1.5 < F < 3.0$ e

por último, maré diurna se $F > 3$. De acordo com os dados medidos em campo a maré dos três pontos é classificada como maré mista com predomínio de maré semidiurna, apresentando duas preamares e duas baixa-mares por dia. O fator de forma dos três pontos de coleta de dados são: Santos (0,39) São Vicente (0,38) e Bertioga (0,40).

O raio de amplitude (coeficiente de assimetria) foi calculado com a fórmula:

$$RA = \frac{AM^4}{AM^2},$$

onde A corresponde a amplitude. A fase relativa foi calculada por

$$FR = 2\theta M2 - \theta M4$$

Onde θ , corresponde a fase em graus e M2 e M4 aos constituintes harmônicos.

De acordo com o cálculo da fase relativa, a corrente dominante é de enchente se $0^\circ < FR < 180^\circ$ e vazante quando $180^\circ < FR < 360^\circ$. Para Santos a $FR = 165^\circ$, ou seja, domínio de corrente enchente. São Vicente e Bertioga têm respectivamente $FR = 179^\circ$ e 186° , ou seja, domínio de vazante, mas bem no limiar, entre vazante e enchente.

Tabela 6 Fator de forma, fase relativa, e raio de amplitude para Santos, São Vicente e Bertioga

	Santos	São Vicente	Bertioga
Fator de forma (F)	0.392	0.390	0.420
Fase Relativa (FR)	-165.560	-179.750	-186.660
Raio de Amplitude (RA)	0.041	0.059	0.085

5.3 Implementação do modelo

Este item descreve a etapa inicial da implementação do modelo hidrodinâmico para o SES. Para a calibração e validação, um modelo numérico baseado em processos (Delft3D) foi aplicado para a situação morfológica mais recente do ano de 2014.

5.3.1 Descrição do modelo

O modelo numérico aplicado neste trabalho é o Delft3D (Deltares – versão “open source”). O Delft3D é modelo que simula os processos hidrodinâmicos através de um

sistema em módulos, capaz de fornecer representações numéricas de ondas, correntes e transporte de sedimentos. As simulações do modelo hidrodinâmico resolvem as equações de Navier-Stokes integradas verticalmente na coluna de água, que inclui os efeitos de Coriolis, fricção de vento, atrito com o fundo e viscosidade turbulenta. Este modelo é utilizado não só em zonas costeiras, mas também em ambientes recifais onde as interações oceanográficas são mais complexas, incluído aplicações em atóis. O módulo utilizado neste trabalho é o FLOW.

O Módulo FLOW é um módulo de simulação hidrodinâmica multi-dimensional (3D ou 2D), que compõe o núcleo do sistema de modelagem. Em águas rasas, fluxos turbulentos podem ser simulados e forçados a partir de dados de entrada variando no tempo, como ventos superficiais e marés, baseado nas equações de águas rasas. Os efeitos da onda, fornecida pelo módulo de ondas, no fluxo se dão principalmente pela quebra da onda e pela indução de correntes, que por sua vez, força o transporte de partículas e material em suspensão. O módulo FLOW considera variações na densidade da água, turbulência e inclusão de áreas alagadas/expostas (*wetting/drying*) no domínio.

O grande número de processos incluídos (cisalhamento do vento, forças das ondas, forças das marés, fluxos impulsionados pela densidade e estratificação devido à salinidade e/ou gradientes de temperatura, mudanças de pressão atmosférica, inundações de planícies entre marés, e outros) no DELFT3D-FLOW, faz com que o mesmo possa ser aplicado a uma ampla variedade de situações e ambientes como em rios, estuários e costas (LESSER et al., 2004). Adicionalmente, DELFT3D-FLOW é amplamente usado e testado, e apropriado para modelar a hidrodinâmica de regiões costeiras.

O modelo Delft3D foi usado na configuração tridimensional, ou seja, o domínio computacional vertical foi determinado por aproximações em 12 coordenadas (camadas) Z e inclui forçantes de temperatura e salinidade em suas simulações. Em estuários pouco estratificados como o SES comumente se utiliza a camada *sigma* no entanto, na presente aplicação, melhores resultados foram obtidos com a utilização das coordenadas Z.

Domínio do modelo

O modelo hidrodinâmico foi forçado com uma série temporal de elevação do nível do mar extraída do WXTide, programa de previsão de maré global, baseado em constantes harmônicas locais. Os dados de nível do mar foram extraídos para o ano de 2014, e foram

impostas nas bordas (contorno aberto) do modelo numérico Delft3D. Adicionalmente, valores médios mensais de vazão de rios na região de estudo foram adicionados como condição de contorno, com o intuito de melhor representar a região.

A seguir são apresentados os limites do domínio do modelo, a geometria da malha computacional utilizada para a discretização espacial e a batimetria da região de estudo. Neste trabalho foi usado o módulo de simulação tri-dimensional (3D), que leva em conta dados de salinidade e temperatura.

Grade computacional e condições de contorno

Uma grade foi construída usando dados de batimetria de diferentes fontes para o ano de 2014. As diferentes batimetrias foram interpoladas na grade do modelo. A grade cobre toda região estuarina, algumas áreas costeiras adjacentes, como as praias de Santos, São Vicente, Guarujá e Bertioga, e grande parte da região oceânica próximas ao estuário.

A grade utilizada possui 41415 elementos, sendo 165 células em x e 251 em y. A resolução da grade varia de aproximadamente 3 km² para a região estuarina e de aproximadamente 2000 km² para a região oceânica. A Figura 5.3 mostra a geometria da malha gerada e os contornos abertos e fechados.

Figura 5.3 Representação da grade do domínio do modelo para a região do SES. Em vermelho são as bordas abertas e em verde as bordas fechadas. Em cinza está representada a malha.

Parâmetros numéricos e físicos

Durante as simulações, o passo de tempo foi de 12 s para se garantir uma estabilidade numérica. O período de simulação para calibração e validação foi de 01 de junho a 01 de agosto de 2014.

O modelo foi inicializado com valores constantes de nível de água, salinidade e temperatura, sendo estes, respectivamente, 1 m, 31 e 20 °C. Os parâmetros de densidade da água (1024 kg.m³) e gravidade (9,81 m/s²) foram considerados constantes em todo o domínio.

5.4 Resultados da validação do modelo

Nesta seção são apresentados os resultados da calibração e validação do modelo para o ano de 2014. A Figura 5.4 mostra a grade implementada com a batimetria para o ano de 2014 utilizada na calibração e validação do modelo.

Figura 5.4 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 2014; (A) toda a grade, porção oceânica e estuarina e (B) região do SES.

O método de validação utilizada fundamenta-se na avaliação da modelagem quanto à sua capacidade de reprodução da circulação hidrodinâmica na região em estudo. Com este intuito são realizadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e as séries de dados coletados na região de interesse.

Para se avaliar o desempenho das modelagens numéricas, parâmetros estatísticos que comparam os resultados da modelagem e os dados de forma quantitativa são usados:

O *Relative Mean Absolute Error* (RMAE) (WALSTRA et al., 2001) é um parâmetro estatístico útil para comparação do vetor velocidade levando em consideração a intensidade e a direção.

$$RMAE = \frac{\langle |X_{observado} - X_{calculado}| \rangle}{\langle |X_{observado}| \rangle}$$

onde, $\langle \rangle$ representa a média e $||$ representa o módulo

O ARMAE (*Adjusted Relative Mean Absolute Error*) é um ajuste do RMAE. No ARMAE é considerado o erro observado dos dados medidos (OE), nos quais tais erros podem estar associados ao tamanho do aparelho, ao princípio da medida e ao princípio de conversão dos dados coletados à unidade de interesse, que incluem premissas de teorias (SUTHERLAND et al., 2004). O erro associado aos ADCPs utilizados nas coletas é de 0.05 m/s. O ARMAE é calculado segundo a equação:

$$ARMAE = \frac{\langle |X_{observado} - X_{calculado}| - OE \rangle}{\langle |X_{observado}| \rangle}$$

Para ambos ARMAE e RMAE, quanto mais próximo de 0 o parâmetro, melhor é a relação entre os dados. O valor ideal é nulo (SUTHERLAND et al., 2004). Os valores de erros estabelecidos por Walstra et al. (2001) são apresentados na Tabela 7. Neste trabalho apenas o ARMAE foi considerado, visto que esse parâmetro considera também o erro dos dados medidos pelo ADCP, na aferição de qualidade do modelo numérico.

Tabela 7 Qualificação do RMAE e ARMAE (WALSTRA et al., 2001)

Qualificação	RMAE e ARMAE
Excelente	<0.2
Bom	0.2 – 0.4
Razoável	0.4 – 0.7
Ruim	0.7 – 1
Péssimo	>1

Neste item é avaliado como o modelo reproduziu os processos hidrodinâmicos na região de estudo, para isto serão apresentadas comparações entre resultados da modelagem hidrodinâmica e os dados medidos na região de estudo.

Comparação com dados de maré do modelo

Resultados de elevação do nível do mar e gerados pelo modelo hidrodinâmico e componentes U (direção W-E) e V (direção N-S) das correntes foram comparados com os dados medidos pelo ADCP para os mesmos locais e períodos.

A série temporal da comparação da curva de variação da elevação do nível do mar, componente U e V das correntes superficial e de fundo, observadas e geradas pelo modelo hidrodinâmico são apresentadas para os pontos dos ADCPs de Santos (Figura 5.5) São Vicente (Figura 5.7) e Bertioga (Figura 5.9). Observa-se que o sistema estuarino funciona em fase uma vez que o nível dos três pontos é bem similar.

Os parâmetros estatísticos ARMAE estimados para quantificar a comparação do dado original e o modelado são apresentados na Tabela 8. Para todos os pontos o modelo reproduziu bem a amplitude e fase do nível e das componentes U e V. Estatisticamente os pontos de São Vicente e Bertioga ficaram abaixo de 0,4 que é considerado bom, já o ponto de Santos a representação do modelo ficou bom para as componentes de fundo e razoável para as componentes de superfície. Para todos os pontos a representação do nível foi excelente. Em Santos, as velocidades positivas da componente U (leste-oeste) e V (norte-sul) representam eventos de enchente, já em Bertioga e São Vicente estes eventos são representados por velocidades negativas, isto se deve a orientação dos canais onde os equipamentos de ADCP foram colocados.

Tabela 8 Parâmetros estatísticos ARMAE das componentes de fundo e superfície U e V e elevação do mar para Santos, São Vicente e Bertioga.

Localização	Santos	São Vicente	Bertioga
Elevação nível mar	0.10	0.11	0.11
Componente U de fundo	0.36	0.29	0.28
Componente U de superfície	0.55	0.30	0.39
Componente V de fundo	0.40	0.12	0.24
Componente V de superfície	0.56	0.18	0.37

Adicionalmente, foram comparadas as temperaturas e salinidades para os três canais para os dados observados e medidos (Figura 5.6, Figura 5.8 e Figura 5.10). Observa-se que o modelo representou de forma satisfatória os parâmetros para os três canais. Nota-se que a maiores salinidades são encontradas em Santos, indicando este canal como principal canal de entrada de águas oceânicas e Bertioga e São Vicente que apresentam menores salinidades, os canais preferenciais de escoamento das águas fluviais.

Figura 5.5 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para Santos. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

Figura 5.6 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para Santos. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

Figura 5.7 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para São Vicente. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

Figura 5.8 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para São Vicente. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

Figura 5.9 Comparação do nível médio do mar, componente u e v da corrente de fundo e superfície observado e modelado para Bertoga. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

Figura 5.10 Comparação da temperatura e salinidade de fundo e superfície observado e modelado para Bertioga. A linha magenta representa dados observados e preta os dados modelados.

5.5 Conclusões

Com base na aplicação, calibração e validação do modelo numérico Delft 3D para o SES, o modelo pode ser considerado calibrado e validado para a aplicação nos diferentes cenários morfológicos, conforme definidos no Capítulo 4. Os resultados estatísticos entre as comparações dos dados observados e modelados mostraram-se satisfatórios. O modelo reproduziu de forma excelente o nível do mar e de forma boa/satisfatória as velocidades das correntes para os três pontos, sendo que o ponto de São Vicente apresentou melhores resultados (ARMAE mais alto=0,30), seguido do ponto de Bertioga (ARMAE mais

alto=0,39), e por último Santos (ARMAE mais alto=0,56). Os dados de nível do mar e velocidade de corrente estão em fase (observados/modelados). Adicionalmente, o fato de a validação ter sido realizada em três locais diferentes, nas desembocaduras de Santos, São Vicente e Bertioga, torna os resultados do modelo mais confiáveis, uma vez que a modelagem representa toda a região estuarina. A distribuição vertical de salinidade e a temperatura foram reproduzidas pelo modelo de forma satisfatória.

Com o modelo considerado calibrado e validado, o modelo pode ser utilizado para os experimentos numéricos dos diferentes cenários morfológicos. Os cenários são aqueles estabelecidos através da análise morfológica, apresentada no Capítulo 4. Essa abordagem, com a combinação de cenários morfológicos pretéritos através da aplicação do modelo numérico validado, permite a avaliação da evolução temporal da hidrodinâmica do SES (Capítulo 6).

Capítulo 6

EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO SES E SUAS IMPLICAÇÕES NOS PROCESSOS ESTUARINOS

6.1 Introdução

Neste capítulo é discutido a evolução morfológica do SES e suas implicações nos processos estuarinos nos diferentes cenários de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014. São também apresentados os cenários morfológicos de 1969, 1975, 1989, com a vazão adicional no Rio Cubatão, representando a Usina Henry Borden.

A morfologia dos estuários é resultado da interação não linear entre a água e sedimentos. A topografia de fundo e sua evolução depende principalmente de dois fatores: i. o fornecimento de sedimentos, e sua direção e magnitude média em longo prazo, de origem costeira ou continental; e ii. mudanças abruptas como tempestades ou obras de engenharia (DRONKERS, 1986). Mudanças nas características morfológicas dos estuários também podem levar a mudanças nos processos estuarinos. A batimetria é um fator que controla grandemente a hidrodinâmica de um estuário. Ou seja, a localização e a profundidade de algumas características, como canais e bancos de areia, tem forte influência na magnitude e direção de marés e ondas (e.g. GEORGE; GELFENBAUM; STEVENS, 2012). A compreensão e previsão da evolução morfodinâmica dos estuários ainda é limitada, devido à sua complexidade e por envolver uma grade escala de tempo e espaço (HIBMA; STIVE; WANG, 2004).

6.2 Material e Métodos

Após a calibração do modelo para o cenário de 2014, que corresponde à situação morfológica mais recente do SES (Capítulo 5), outras simulações numéricas foram realizadas para avaliar as alterações dos processos estuarinos e morfológicos da região. Os cenários, conforme definidos no Capítulo 4, são os seguintes em ordem cronológica: i) 1876, ii) 1969 iii) 1975 iv) 1989. Para estes cenários morfológicos pretéritos, o modelo foi implementado usando-se a mesma grade e parâmetros do ano de 2014 (Capítulo 5). No entanto, para retroceder no tempo e representar cenários morfológicos pretéritos, os dados batimétricos dos diferentes anos analisados, foram aplicadas no modelo numérico, substituindo os dados batimétricos atuais. As regiões não cobertas pelos levantamentos pretéritos, como a porção oceânica, foram mantidas com os dados disponíveis para 2014. Além destes cinco cenários, outros três cenários foram simulados para os anos de 1969, 1975 e 1989, nos quais foi considerada também uma vazão adicional para o Rio Cubatão, referente a vazão adicional da Usina Henry Borden de $100\text{m}^3/\text{s}$. Estes são chamados de cenários com vazão adicional. Os outros cenários são chamados de cenários com vazão normal (sem a vazão adicional no Rio Cubatão).

Posteriormente, para analisar a evolução hidrodinâmica do SES, foram analisados alguns processos de forma comparativa, como a distribuição longitudinal de salinidade, parâmetros de estratificação, descarga cumulativa, diferenças de velocidade média na coluna de água e análise e parâmetros de assimetria de maré (como raio de amplitude e fase relativa). Essa análise permite avaliar as alterações na dinâmica do SES ao longo do tempo, em função de intervenções antrópicas, servindo de subsídios para a análise não só do SES, mas também conhecimentos gerais sobre impactos do aprofundamento de canais em sistemas estuarinos.

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Resultados das simulações

Foram simulados no modelo Delft 3D os cenários dos anos 1876, 1969, 1975, 1989. São apresentadas as batimetrias interpoladas nas grades utilizadas nas simulações de 1876 (Figura 6.1), 1969, (Figura 6.2), 1975 (Figura 6.3), e 1989 (Figura 6.4). Os dados batimétricos são considerados positivos no modelo numérico, e assim representados nas Figuras 6.1 a 6.4.

Observa-se que o ano de 1876 é o único cenário anterior às dragagens no canal do porto de Santos. As dragagens iniciam-se de fato entre os anos de 1891-1909. No entanto, o primeiro cenário disponível após as dragagens é o cenário de 1969, quando o processo de dragagem é iniciado no canal de Piaçagüera. Entretanto, é a partir de 1975 que este processo se estabelece no canal do porto de Santos, seguindo até a porção oceânica. A partir deste cenário as batimetrias se tornaram mais constantes/homogêneas. Os padrões batimétricos dos cenários de 1975 e 1989 são similares tanto em relação às profundidades, quanto aos locais onde elas são encontradas (porções estuarina ou oceânica), no entanto no cenário de 1989 a região central do canal não foi dragada. O cenário de 2014 é o ano que houve a maior dragagem em termos de profundidade e extensão, e com início ainda na parte oceânica, entrando no canal do porto de Santos e seguindo até o fim do canal de Piaçagüera.

Figura 6.1 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1876; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.

Figura 6.2 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1969; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.

Figura 6.3 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1975; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.

Figura 6.4 Batimetria e grade utilizadas no modelo para o cenário de 1989; (A) porção estuarina e oceânica (toda a grade) e (B) porção estuarina região do SES.

Campo de correntes

O campo de correntes é mostrado para os cenários de 1876 (Figura 6.5 e 6.6); 1969, com vazão normal (Figuras 6.7 e 6.8) e adicional (Figura 6.10); 1975, com vazão normal (Figuras 6.11 e 6.12) e adicional (Figura 6.13 e Figura 6.14); 1989, com vazão normal (Figuras 6.15 e 6.16) e adicional (Figura 6.17 e Figura 6.18); e 2014 (Figura 6.19 e Figura 6.20) durante o período de sizígia para todo o estuário, em instantes de maré de enchente e vazante.

A partir da vista geral dos campos de velocidade e vetores das correntes médias na coluna de água, nota-se que a região costeira apresenta velocidades de correntes com magnitudes inferiores às regiões internas do estuário. Para todos os cenários é observado que as maiores velocidades encontradas são próximas às desembocaduras dos canais de Santos, São Vicente e Bertioga e na porção do canal de Santos mais ao norte. Adicionalmente, durante a maré vazante as velocidades são maiores que os instantes de enchente, para todos os cenários com vazão normal e vazão adicional (para os anos de 1969, 1975 e 1989).

Para o cenário de 2014, observou-se que as velocidades de corrente foram menores ao longo dos principais canais (Santos, São Vicente e Bertioga) em relação aos demais cenários, e as velocidades seguiram mais constantes (menor variabilidade) nestas regiões. Os demais cenários apresentam algumas regiões com altas e baixas profundidades (alguns pontos com profundidades perto de 25 m e outros próximos a zero), gerando gradientes nas velocidades das correntes. Já no cenário de 2014, onde o canal é todo dragado as profundidades são constantes em torno de 15 m ao longo de quase todo o canal (apenas perto da desembocadura o canal é um pouco mais profundo).

Figura 6.5 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1876 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioiga.

Figura 6.6 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1876 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.

Figura 6.7 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1969 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.

Figura 6.8 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia vazante)-Cenário 1969 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.

Figura 6.9 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1969 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertiooga.

Figura 6.10 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1969 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioiga.

Figura 6.11 Campo de velocidade média (m/s) durante de maré sizígia (enchente)-Cenário 1975 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioxa.

Figura 6.12 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1975 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioga.

Figura 6.13 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1975 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertoga.

Figura 6.14 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1975 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioiga.

Figura 6.15 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1989 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioja.

Figura 6.16 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1989 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioxa.

Figura 6.17 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 1989 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioiga.

Figura 6.18 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 1989 com vazão adicional; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertiooga.

Figura 6.19 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (enchente)-Cenário 2014 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertoga.

Figura 6.20 Campo de velocidade média (m/s) durante maré de sizígia (vazante)-Cenário 2014 com vazão normal; A) todo estuário, B) canal de Santos C) canal de São Vicente D) canal de Bertioiga.

6.3.2 Comparações entre os cenários e suas implicações nos processos estuarinos

A partir das simulações numéricas e das características morfológicas do ambiente estudado, foi observado que a dinâmica do estuário é sensível às mudanças em sua morfologia ao longo dos anos.

Durante o período estudado de 1876 a 2014, o SES passou por mudanças morfológicas, em especial no canal do porto de Santos devido às dragagens. Foi observado que variações nos processos estuarinos ocorrem principalmente onde há mudanças na morfologia no estuário, no entanto, consequências são observadas em praticamente todo o SES. Para cada cenário, foram analisados alguns processos de forma comparativa, como distribuição longitudinal de salinidade, parâmetros de estratificação, descarga cumulativa (fluxo de volume instantâneo integrado da área de uma seção transversal específica), diferenças de velocidade média na coluna de água e análise e parâmetros de assimetria de maré (como raio de amplitude e fase relativa).

Para cada um dos processos são apresentados os resultados para todos os cenários com as vazões normais (sem a vazão adicional no Rio Cubatão), de forma a avaliar apenas os efeitos da morfologia nos processos estuarinos. Posteriormente, para alguns processos, também são apresentados os cenários com a vazão normal e com a vazão adicional no Rio Cubatão para os cenários de 1969, 1975 e 1989; permitindo a avaliação dos efeitos da vazão adicional que era lançada no Rio Cubatão.

6.3.2.1 Distribuição longitudinal de salinidade no canal do porto de Santos

As Figura 6.21 e Figura 6.22 mostram a distribuição da salinidade ao longo de um perfil longitudinal no canal de Santos, durante um instante de maré enchente de sizígia. O perfil se estende da desembocadura em direção ao estuário acima/montante para os cenários de 1876, 1969, 1975 e 1989 e 2014 com vazões normais (Figura 6.21) e para 1969, 1975 e 1989 com vazões adicionais (Figura 6.22). Na análise do perfil de salinidade (Figura 6.21), é possível observar que o cenário de 2014 é o que apresenta a maior intrusão salina, avançando estuário acima. Durante a maré de quadratura o comportamento da distribuição de salinidade foi o mesmo; o cenário de 2014 é o que tem maior intrusão salina estuário acima, e o alcance (distância) foi ainda maior que o alcance durante a maré de sizígia, estuário acima.

Figura 6.21 Distribuição da salinidade ao longo de um perfil longitudinal na coluna de água durante um instante de maré enchente de sizígia (29/06 às 18hrs) para o canal de Santos (desembocadura até o estuário acima) para os cenários com vazão normal: (A) 1876, (B) 1969, (C) 1975, (D) 1989 e (E) 2014.

Nos cenários com a vazão adicional (Figura 6.22), observa-se que ocorre uma maior estratificação da coluna de água (variação vertical de salinidade) em comparação aos cenários equivalentes com a vazão normal.

Segundo Miranda et al., (2017), em estuários, quando a descarga do rio aumenta, o entranhamento é o mecanismo predominante. O entranhamento é a transferência unidirecional de água da camada inferior (salgada) para a camada superior (água doce) e é um processo de natureza advectiva. No entanto, quanto maior é a amplitude da maré, maior é a sua influência em gerar mistura através de processos de advecção e difusão.

Figura 6.22 Distribuição da salinidade ao longo de um perfil longitudinal na coluna de água durante um instante de maré enchente de sizígia (29/06 às 18hrs) para o canal de Santos (desembocadura até o estuário acima) para os cenários com vazão adicional: (A) 1969 , (B) 1975, (C) 1989.

6.3.2.2 Parâmetros de estratificação

A distribuição de salinidade e a circulação dos estuários são determinadas pela geomorfologia, marés e o fluxo de água doce. Neste item é realizada uma comparação da estratificação entre os cenários, baseada no diagrama de circulação e estratificação para a classificação de sistemas estuarinos (HANSEN E RATTRAY, 1966). O parâmetro de estratificação ($\Delta S / \langle S_0 \rangle$) leva em consideração dois parâmetros: (1) o quociente entre a diferença da salinidade do fundo e da superfície, e (2) a salinidade média no local. O crescimento do parâmetro de estratificação significa um aumento da estratificação vertical.

As Figura 6.23 e Figura 6.24 apresentam os parâmetros de estratificação ao longo de um período de 18 dias, abrangendo um período de maré de quadratura e sizígia extraídos de pontos dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga). A localização dos pontos é o P-4 para Santos, P-6 para São Vicente, P-5 para Bertioga (Figura 6.34). Os parâmetros foram calculados a partir dos resultados da modelagem numérica para todos os cenários com as vazões normais (sem a vazão adicional no Rio Cubatão), a fim de verificar apenas os efeitos da morfologia (Figura 6.23). A Figura 6.24 considera apenas os cenários de 1969, 1975 e 1989 com a vazão normal e com a vazão adicional.

O grau de estratificação de um estuário é condicionado à largura e profundidade do canal, vazão dos rios, influência da maré e ação dos ventos. Na análise do parâmetro de estratificação observa-se que houve diferenças entre os cenários, principalmente durante a quadratura e nos pontos de Santos e São Vicente. O ponto de Santos foi o local que apresentou maiores valores do parâmetro de estratificação, ou seja, a estratificação vertical nesse canal é maior que nos demais.

A distribuição da salinidade oscila entre os períodos de maré de quadratura e sizígia. Observa-se que durante a quadratura o parâmetro de estratificação é maior que o observado durante a sizígia. Esse comportamento é esperado, uma vez que durante a quadratura as amplitudes de maré são menores, e consequentemente a influência da descarga dos rios é proporcionalmente maior. Com a descarga de água doce pela superfície ocorre a entrada de água salgada pelo fundo. Desta forma ocorre uma estratificação na coluna d'água. Já durante o período de maré de sizígia, as amplitudes de maré são maiores, proporcionando uma coluna de água mais homogênea (NICOLITE et al., 2009).

Durante a maré de sizígia as misturas devido a maré chegam aos limites máximos e consequentemente a estratificação chega ao seu mínimo (VALLE-LEVINSON, 2010).

Para o ponto de Santos, o cenário de 2014 apresentou menores oscilações no parâmetro de estratificação ao longo do período observado, sendo que durante a sizígia apresentou valores menores do parâmetro de estratificação e maiores na quadratura, em relação aos demais cenários. No entanto, essa análise representa apenas um ponto no canal, que fica mais salino em função da intrusão salina maior nesse cenário. Na Figura 6.21, ao longo do canal a estratificação aumenta com o aprofundamento no cenário de 2014, conforme esperado (e.g. Dyer, 1997; Ralston et al., 2018). Assim, o SES passa de um sistema dominado pelo mecanismo de bombeamento de maré, com circulação mais barotrópica antes do aprofundamento, para um sistema com importância cada vez maior da circulação gravitacional. Grasso e Le Hir, (2019) observaram esse mesmo fenômeno analisando a circulação do estuário do Sena (França) entre 1960 e 2010, com o aprofundamento do canal tornando os processos baroclínicos cada vez mais importantes na circulação estuarina.

No ponto de São Vicente, o parâmetro de estratificação apresentou diferenças em torno de 50% inferiores, em relação ao ponto de Santos para alguns cenários. No cenário de 1876 foram observados os maiores valores, ou seja, mais estratificado que os outros cenários.

Já o ponto de Bertioga, teve parâmetros bem baixos (ordem de 10) em relação aos outros pontos. Adicionalmente, durante a quadratura foram observados os menores parâmetros de salinidade, comportando-se de maneira diferente quando comparado aos outros pontos. O cenário de 2014 teve o comportamento semelhante aos outros pontos (Santos e São Vicente); apresentou maiores valores durante a quadratura.

Miranda et al. (2012) classificam o canal de Piaçagüera como sendo do tipo 2a (parcialmente misturado e fracamente estratificado).

Figura 6.23 Nível médio do mar (A) e parâmetro de estratificação para (B) Santos, (C) São Vicente e (D) Bertioga com a vazão normal, para os cenários de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014.

De acordo com as análises do parâmetro de estratificação no ponto de Santos e São Vicente, o padrão foi o mesmo durante a quadratura e sizígia, durante a quadratura o parâmetro de estratificação foi maior que em relação a sizígia. O cenário de 2014 apresenta maiores parâmetros de estratificação durante a maré de sizígia e menores parâmetros durante a quadratura quando comparados aos outros cenários. Os cenários com a vazão adicional tiveram valores do parâmetro de estratificação em torno de 50% maiores que os cenários com a vazão normal, ou seja, a estratificação vertical nestas condições é bem maior como esperado.

Figura 6.24 Nível médio do mar (A) e parâmetro de estratificação para (B) Santos, (C) São Vicente e (D) Bertioga com a vazão adicional, para os cenários de 1969, 1975, 1989.

6.3.2.3 Descargas cumulativas

As descargas cumulativas para todos os cenários para três seções transversais (Santos, São Vicente e Bertioga) mostram como é o padrão dos fluxos dentro do estuário. As seções transversais se localizam nas desembocaduras de cada canal.

A Figura 6.25 mostra a descarga cumulativa para todos os cenários com a vazão normal, onde foi considerando a apenas as mudanças na morfologia, ou seja, sem as vazões adicionais no rio Cubatão. As descargas positivas em Santos (em azul), representam a entrada de água no sistema, e negativas como São Vicente (em vermelho), e Bertioga (em amarelo), representam a saída de água do sistema.

Figura 6.25 Descarga cumulativa ($m^3 \times 10^8$) para os cenários de 1876 a 2014 com a vazão normal para a seção em Santos, São Vicente e Bertioga.

A Figura 6.26 mostra a descarga cumulativa para os cenários com a vazão adicional no rio Cubatão. O comportamento de importação de águas em Santos e exportação em São Vicente e Bertioga também é observado nos cenários com vazão adicional. Os volumes dos cenários com as vazões adicionais possuem valores em torno de 80% acima daqueles observados nos cenários com a vazão normal.

Figura 6.26 Descarga cumulativa ($\text{m}^3 \times 10^8$) para os cenários de 1969, 1975 e 1989 com a vazão adicional para a seção em Santos, São Vicente e Bertioga.

A Figura 6.27 apresenta as descargas cumulativas de forma comparativa entre os anos para cada seção (Santos, São Vicente e Bertioga) para todos cenários com a vazão normal. A circulação residual no estuário é alterada em função das mudanças morfológicas no canal do porto, e isso se reflete no balanço de volume de água observado através da descarga cumulativa. Houve uma diminuição dos volumes de água transportados no canal de Santos entre 1876 e 2014, enquanto em São Vicente existe um aumento no volume de água transportado no mesmo período. Para o cenário de 2014 há uma tendência residual de entrada de água costeira via canal de Santos e exportação de água via canal de São Vicente e Bertioga. Já para o cenário de 1876, no canal de São Vicente durante a sizígia havia uma leve tendência de importação de água para o estuário (momentos onde as descargas ficam positivas, acima do eixo zero que está destacado na figura). O canal de Bertioga teve o comportamento muito similar em todos os cenários (em volumes). Esses ajustes ocorrem no sistema em função do aumento da profundidade e consequente área da seção transversal do canal de Santos, levando a redução nas velocidades de correntes e alterações nos volumes residuais transportados. Em função desse processo, existe o ajuste do sistema para o transporte do volume de água (prisma de maré) através dos outros canais, principalmente através do canal de São Vicente.

Alterações na circulação residual em estuários dragados foram observados em diversos sistemas, e geralmente estão associados às mudanças de fricção de fundo com o aprofundamento do canal (e.g. Amin, 1983; Vellinga et al., 2014; Jay et al., 2011). Sendo a tensão de cisalhamento junto ao fundo a maior fonte de fricção e é a fonte de turbulência e mistura vertical, essas alterações representam grandes perturbações na circulação estuarina (Ralston et al., 2018).

Figura 6.27 Descarga cumulativa ($\text{m}^3 \times 10^8$) comparativa para os cenários de 1876 a 2014 com a vazão normal para a seção em (A) Santos, (B) São Vicente e (C) Bertioga.

Os resultados da Figura 6.27 e Tabela 9 apresentam os cenários com a vazão normal, ou seja, consideram-se apenas as alterações na morfologia do estuário para o mesmo período de 20 dias. Os resultados para as médias das descargas cumulativas para os cenários de 1876 a 2014 (Tabela 9) indicam que houve mudanças no padrão de transporte de água no estuário. Em 1876, metade do fluxo de água entrava via canal de Santos. A saída era via canal de Bertioga, com pequena parte via São Vicente (em torno de 1%). O fluxo que entrava em 1876 no canal de Santos ($9,99 \times 10^7 \text{ m}^3$), diminuiu em torno de 60% em 2014 ($4,03 \times 10^7 \text{ m}^3$).

Tabela 9 Resultados da descarga cumulativa para as seções transversais de Santos, São Vicente e Bertioga para o período de 10/06 a 30/06.

	1876 (m³.10⁷)	1969 (m³.10⁷)	1975 (m³.10⁷)	1989 (m³.10⁷)	2014 (m³.10⁷)
Santos	9.99	5.25	6.23	8.12	4.03
São Vicente	-0.78	-5.71	-3.9	-2.92	-6.63
Bertioga	-9.34	-9.17	-10	-9.1	-9.54

(nota: os valores são as médias das descargas cumulativas e os valores positivos indicam transporte para dentro do estuário e negativos para fora do estuário)

6.3.2.4 Velocidade média da corrente

Os resultados das simulações mostram que houve alterações na dinâmica do estuário para os diferentes cenários (1876, 1969, 1975, 1989 e 2014). Essas mudanças podem ser observadas nas Figura 6.28, Figura 6.29, Figura 6.30, as quais mostram um instante (enchente) da velocidade média na coluna de água para os cenários com a vazão normal para três locais, em Santos, São Vicente e Bertioga, durante a maré de sizígia.

A Figura 6.28 mostra a velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e na seção transversal do canal de Santos. As séries temporais do ponto de Santos evidenciam as menores velocidades em 1876 e 2014. As diferenças entre os anos de menores (1876 e 2014) e maiores velocidades (1969, 1975 e 1989) sugerem diferenças médias de aproximadamente 50% (Figura 6.28 C). Essas observações corroboram as análises morfológicas do Capítulo 4, onde as profundidades são maiores para os anos de 1876 e 2014 nas proximidades da desembocadura (local do ponto e seção transversal) do canal de Santos.

Na seção de São Vicente (Figura 6.29) também foram observadas menores velocidades nos cenários de 1876 e 2014 em relação aos outros cenários, com diminuição média inferior a 5%.

Na seção de Bertioga (Figura 6.30), as velocidades se mantêm praticamente constantes ao longo do tempo, entre os diferentes cenários. Em função dessa similaridade entre os cenários, não é apresentada a série temporal para a seção de Bertioga (Figura 6.30).

Figura 6.28 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizigia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Santos. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal.

Figura 6.29 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizigia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de São Vicente. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal.

Figura 6.30 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Bertioiga. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média para todos cenários com a vazão normal.

Os resultados das simulações para os cenários de 1969, 1975 e 1989 com a vazão normal e vazão adicional são apresentados nas figuras 6.31, 6.32 e 6.33, a fim de verificar os efeitos da vazão adicional no Rio Cubatão. Houve leves aumentos nas velocidades nos cenários com a vazão adicional em relação aos cenários com a vazão normal para Santos e São Vicente.

Em Santos (Figura 6.31) os cenários com vazão normal tiveram um leve aumento em torno de 2% em relação aos cenários com vazão adicional. Em São Vicente (Figura 6.32) o aumento foi inferior a 1%. Na seção de Bertioiga (Figura 6.33) não houve mudanças significativas na velocidade média entre os diferentes cenários com a vazão normal e adicional, assim como ocorreu nos cenários considerados apenas com a vazão normal.

Figura 6.31 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizígia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Santos. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de

velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal de todos os cenários com a vazão normal e vazão adicional.

Figura 6.32 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizigia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de São Vicente. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional, (C) série temporal com as velocidades no ponto do canal dos cenários com a vazão normal e adicional.

Figura 6.33 Representação da simulação da velocidade média na coluna de água (sizigia/enchente) no ponto e seção transversal do canal de Bertioiga. (A) Localização do ponto e perfil, (B) vetor de velocidade média dos cenários com a vazão normal e adicional. retrato

Nas áreas em que há uma diminuição na velocidade das correntes, ocorre preferencialmente uma maior deposição de sedimentos e consequentemente assoreamento. Desta forma, percebe-se que alguns cenários tendem a processos erosivos e outros a processos deposicionais. E que ao longo dos anos, com a dragagem do canal de Santos, o canal ficou mais profundo e com profundidades mais constantes, gerando consequentemente uma diminuição das velocidades das correntes.

6.3.2.5 Análise de maré

A morfologia estuarina é, em grande parte, determinada pelo padrão residual de transporte de sedimentos e vice-versa. O transporte residual de sedimentos depende de diferenças de magnitude e duração entre as correntes de maré de enchente e vazante. Tais diferenças ("assimetria das marés") são produzidas pela distorção da onda de maré que se propaga na plataforma costeira e entra em baías e estuários.

A assimetria das marés pode ser representada pelas constituintes harmônicas das marés. A constituinte M2 é a constituinte lunar dominante semi-diurna (M é para lua, 'moon' em inglês) e 2 para a frequência de duas vezes por dia), já a constituinte M4 é a constituinte quarto diurna. Desta forma, as relações de M4 e M2 e a amplitude de M2 (que corresponde aos valores de Razão de Amplitude - RA) podem ser analisadas para determinar a magnitude da assimetria das marés gerada dentro do estuário. Já, as fases relativas de M2 e M4 determinam o tipo de assimetria (DIAS; VALENTIM; SOUSA, 2013). Os coeficientes de assimetria RA (razão de amplitude) e FR (fase relativa) são representados pelas seguintes equações:

$$RA = \frac{AM4}{AM2} \qquad FR = 2x\theta M2 - \theta M4$$

Onde A é a amplitude em m, e θ indica a fase em graus e M4 e M2 correspondem as constituintes harmônicas. Segundo a equação de RF, a corrente dominante é de vazante se $0^0 < FR < 180^0$ e de enchente se $180^0 < FR < 360^0$.

A partir das séries temporais de elevação da superfície do mar dos resultados gerados pelas simulações do modelo, realizou-se uma extração das constantes harmônicas de marés (fase e amplitude), através da aplicação do pacote de sub-rotinas t_tide no Matlab de Pawlowicz, R. et al (2012) para todos os cenários de 1876, 1969, 1975, 1989 e 2014. Essas análises foram feitas com os cenários de 1969, 1975 e 1989 com as vazões adicionais apenas. A partir destas constates harmônicas foram calculados o Fator de forma de maré (F) e os coeficientes de assimetria de maré, como o raio de amplitude (RA) e fase relativa (FR). Esses cálculos foram realizados para diversos pontos nos canais do estuário, das três desembocaduras (Santos, São Vicente e Bertioga) em direção a montante do estuário. A localização dos pontos é apresentada na Figura 6.34.

Figura 6.34 Localização dos pontos para os parâmetros de maré e de estratificação para os três canais de Santos, São Vicente e Bertioga.

Espera-se que variações de amplitude ocorrem quando mudanças na morfologia e na profundidade no estuário são maiores, como na transição dos canais principais e nas áreas da desembocadura e estuário acima.

De acordo com a Figura 6.35, a principal constituinte harmônica, M2, no geral aumenta progressivamente para dentro do estuário. Houve também um aumento da M2 de 1876 a 2014, sendo que para o cenário de 2014, a amplitude da principal componente diurna, M2 manteve-se com valores acima dos outros cenários, principalmente no canal de Santos, em que oscilou entre 0,34 m, na desembocadura, e 0,39 m, estuário acima, um aumento de aproximadamente 10%. Normalmente em estuários, é esperado que ocorra uma diminuição da propagação da maré devido a dissipação de energia ocasionado pelo atrito de fundo (DIAS; VALENTIM; SOUSA, 2013; IGLESIAS et al., 2019). O aumento da amplitude de M2 estuário adentro sugere que esses processos não prevaleçam e sim modos de ressonância no estuário, o que significa que a convergência de maré estuário acima prevalecem sobre a fricção. Esse efeito de ressonância é mais evidente em correntes de marés em estuários de grandes dimensões e está condicionado aos efeitos da rotação

da Terra (aceleração de Coriolis). Esses tipos de estuários são chamados de estuários *hipersincrônicos* (LANA; BERNARDINO, 2018; MIRANDA et al., 2012).

Figura 6.35 Constituinte de maré M2 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.

A M4 é uma constituinte de águas rasas que é fortemente influenciada por mudanças na morfologia e batimetria. Desta forma as variações de amplitude e fase ocorrem em áreas onde existem mudanças significativas de morfologia e batimetria.

De acordo com os resultados a componente M4, no canal de Santos, para os cenários de 1876, 1969 e 1975 teve uma leve diminuição ao longo do canal adentro. No cenário de 2014, a componente se manteve estável estuário acima. O cenário de 2014 tem o maior valor de M4. No canal de São Vicente, para todos os cenários a componente tem uma diminuição logo na entrada do canal e depois volta a aumentar canal adentro. Já para o canal de Bertioga, houve um aumento da M4 logo na entrada do canal e depois diminui à montante para todos os cenários. De forma geral, todos os cenários tiveram uma leve diminuição da M4 estuário acima, no cenário de 2014 para o canal de Santos se manteve

com valores próximos (Figura 6.36). Isso mostra a redução da influência da morfologia na propagação da maré, na medida em que o canal é aprofundado.

Figura 6.36 Constituinte de maré M4 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.

Na Figura 6.37, observa-se que o raio de amplitude M4/M2 tem um comportamento similar ao da amplitude de M4 em todos os canais e cenários. Nas desembocaduras dos canais quase não são observadas diferenças no raio de amplitude, com as maiores diferenças sendo observadas em direção a montante, e principalmente no cenário de 2014, onde são observados os maiores valores de raio de amplitude. Ou seja, no cenário de 2014 é onde ocorrem as maiores assimetrias de maré estuário acima.

Os resultados também mostraram diferenças na propagação da maré nas duas áreas principais do estuário (estuário superior e inferior), decorrentes de um equilíbrio entre convergência/divergência e atrito de fundo e efeitos advectivos. Há um atraso de fase à medida que a onda se move em direção ao estuário acima. Nas áreas rasas a M2 é atenuada fortemente, enquanto o oposto ocorrer para a M4 e a M6, que são amplificadas fortemente, induzindo assim a assimetria de maré.

Figura 6.37 Raio de amplitude M4/M2 ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.

A fase relativa apresentou grandes diferenças entre os cenários (Figura 6.38), principalmente nos canais de Santos e São Vicente. Em todos os canais há uma diminuição da fase relativa ao longo do estuário acima. O cenário de 2014 apresentou uma diminuição de aproximadamente 35% em relação ao cenário de 1876, no canal de Santos, estuário acima. As fases relativas dos canais de São Vicente e Bertioga são superiores as fases do canal de Santos. Este padrão foi observado na análise dos dados disponíveis de maré para o ano de 2014 (Capítulo 5), onde através do cálculo da fase relativa, pode-se concluir que em Santos a FR é igual a 165° , ou seja, predomínio de corrente enchente. Em São Vicente e Bertioga a RF é igual a, respectivamente, 179° e 186° , ou seja, predomínio de vazante.

No entanto, para os dados modelados o cálculo de fase relativa serve apenas para observar as diferenças entre os cenários e não para quantificar com o objetivo de avaliar a dominância. Isto é consequência de limitações dos experimentos numéricos, uma vez que para a constituinte de águas rasas M4, a fase não foi muito bem representada pelo modelo. Deve-se salientar que existem alguns erros associados na determinação da predição das fases de constituintes de águas rasas (e.g. DIAS; VALENTIM; SOUSA,

2013). Segundo os autores, os erros significativos encontrados nas constituintes de águas rasas não são inesperados, uma vez que a constituinte de água rasa M4 é comumente mais difícil de prever do que as principais constituintes astronômicas. Os erros de previsão de M4/M6 podem ocorrer devido à baixa acurácia de batimetria que não podem ser corrigidas pelos ajustes de coeficiente de fricção de fundo nas modelagens numéricas.

Figura 6.38 Fase relativa (FR) ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.

Como o SES é de micro-maré e as marés primárias são semi-diurnas, as amplitudes de M2 e S2 são maiores que as constituintes diurnas, O1 e K1, sendo dessa forma esperado um número de forma (F) baixo. O fator de forma (F) teve uma diminuição estuário acima para todos os cenários em todos os canais, como consequência do aumento da amplitude das constituintes semi-diurnas nestas áreas (Figura 6.39), como a M2.

Figura 6.39 Número de forma (F) ao longo dos três canais (Santos, São Vicente e Bertioga) do estuário. O eixo x é distância dentro do estuário a partir entrada do estuário, onde 0km equivale aos pontos SA_P1 (Santos), SV_P1 (São Vicente) e BE_P1 (Bertioga) e se localizam na desembocadura. Os demais pontos estão ao longo do canal estuário acima.

Com base nas análises de todos os cenários espera-se que o cenário de 2014, apresente as maiores amplificações de amplitude de maré e assimetrias de maré no estuário. As intervenções de dragagem/aprofundamento do canal do porto de Santos podem ter contribuído para a amplificação de maré, mudança da circulação no estuário e o aumento da assimetria de maré com predominância de maré enchente. Conforme mencionado anteriormente, a alteração da tensão de cisalhamento de fundo, em função do aprofundamento de canais, muitas vezes leva a alterações na amplitude de maré e mudanças de fase com o aumento da velocidade de propagação da onda de maré (RALSTON et al., 2018). Esse fenômeno foi observado em diversos estuários, como no Rheno-Meuse (VELLINGA et al., 2014); Elba e Ems (WINTERWERP; WANG, 2013); Columbia (JAY et al., 2015) (JAY et al., 2011); Delaware (DiLorenzo et al., 1993); Modaomen (CAI et al., 2012); Hudson (TALKE et al., 2014; RALSTON et al., 2018), entre outros. Esses mecanismos contribuem para um aumento no transporte residual (WINTERWERP; WANG, 2013). A amplificação da maré fortalece os transportes de maré de enchente e vazante, quando há assimetria de maré. Ou seja, um estuário com domínio de enchente se tornará mais ainda dominado por enchente. O estudo de Van

Maren et al. (2015), por exemplo, sugere que o aumento na concentração de sedimentos em suspensão pode ser atribuído principalmente ao aumento do transporte de sedimentos devido a alterações na circulação estuarina causada pelas dragagens e aprofundamento dos canais de maré do estuário de Ems, localizado entre a Holanda e Alemanha.

Em adição às variáveis físicas envolvidas nesses processos de alterações hidrodinâmicas em função das mudanças morfológicas causadas pela dragagem, ecossistemas também são afetados. Alterações nos tempos de residência e retenção de nutrientes, por exemplo, levam a reduções na troca vertical de oxigênio na coluna de água e.g. Talke et al. (2009) ou alterando a inundação das áreas alagáveis adjacentes aos canais (JAY et al., 2015) podendo causar impactos na fauna e flora dessas áreas através da zonação ecológica.

6.4 Conclusões

A partir das simulações numéricas e das características morfológicas do ambiente estudado, espera-se que a dinâmica do estuário seja sensível às mudanças em sua morfologia ao longo dos anos. As mudanças morfológicas no estuário resultaram em alterações nos processos estuarinos como:

- No cenário de 2014 as velocidades de corrente média foram inferiores ao longo dos principais canais (Santos, São Vicente e Bertioxa) em relação aos demais cenários, e as velocidades apresentaram menores variações nestas regiões, sendo que durante as marés de vazante as velocidades médias para todos os cenários foram superiores em relação ao período de maré de enchente;
- O cenário de 2014 é o cenário que apresenta uma intrusão salina que mais avança estuário acima e apresenta maiores parâmetros de estratificação durante a maré de sizígia e menores parâmetros durante a quadratura quando comparados aos outros cenários. Ocorreram maiores estratificações nos cenários com a vazão adicional. Santos é o canal onde são encontradas as maiores estratificações (em relação aos outros canais).

- De acordo com as descargas cumulativas, houve mudanças no transporte estuarino entre os cenários. Os resultados para as médias das descargas cumulativas para os cenários de 1876 a 2014 indicam que houve mudanças no padrão de transporte de água no estuário. Em 1876, metade da entrada do fluxo de água entrava via canal de Santos. A saída era via canal de Bertioga, com pequena parte via São Vicente (em torno de 1%). O fluxo que entrava em 1876 no canal de Santos ($9,99\text{m}^3 \times 10^7$), diminuiu em torno de 60% em 2014 ($4,03\text{m}^3 \times 10^7$).
- Velocidades médias seção e ponto: o ponto de Santos que teve maiores diferenças entre os cenários, seguido de São Vicente. No canal de Bertioga as velocidades se mantêm praticamente constantes entre os cenários. Nos cenários de 1876 e 2014 foram encontradas as menores velocidades. Quando comparados os cenários com a vazão normal e adicional, quase não foram observadas diferenças. As maiores diferenças eram esperadas no canal de Santos, pois este canal passou por dragagens.
- Aumento da assimetria de maré estuário acima. O cenário de 2014 apresenta as maiores assimetrias de maré estuário acima.
- Os resultados da evolução hidrodinâmica do SES mostram que o gradual processo de aprofundamento do canal de Santos e Piaçagüera resultam em alterações locais de parâmetros de circulação estuarina, como a propagação da maré e estratificação da coluna de água; e também parâmetros relacionados ao sistema estuarino como um todo, como os transportes residuais de água, e consequentemente transporte de materiais, através dos canais do SES.

Capítulo 7

CONCLUSÕES FINAIS

7.1 Conclusões gerais

Com base na aplicação do modelo numérico hidrodinâmico tridimensional para o cenário de 2014 no SES, e para diferentes cenários morfológicos, como definidos no Capítulo 4, foi possível avaliar a evolução da hidrodinâmica do SES ao longo das últimas décadas. A abordagem do trabalho, de retroceder no tempo através da aplicação do modelo validado, em cenários morfológicos pretéritos, é inédita para o SES e mostra o importante impacto causado pelo aprofundamento do canal sobre o estuário. As mudanças aqui apresentadas para o SES e as implicações para o seu funcionamento, demonstram a importância de avaliar mudanças morfológicas em função de dragagens (ou alterações artificiais de vazão) no seu uso e manejo. Do ponto de vista biológico, tais alterações no padrão de circulação estuarina são importantes e afetam parâmetros que dependem da renovação de suas águas, como a produção primária e secundária (e.g. Filgueira et al., (2014); Philips et al., (2012); Gobler et al., (2005)), assim como a alteração nos padrões de circulação e estratificação nos estuários podem afetar a distribuição de organismos (MITCHELL et al., 2015).

Assim, conforme demonstrado em cada capítulo, os resultados obtidos permitem responder às perguntas de pesquisa listadas nos objetivos do Capítulo 1:

1. Houve alterações significativas na hidrodinâmica e na morfologia do SES antes e depois da construção do porto/dragagem do canal do porto?

A avaliação da evolução morfológica do SES, com a confecção de mapas e perfis batimétricos, analisados de forma comparativa entre os anos, permitiu quantificar a variação da batimetria do canal de Santos. Os mapas batimétricos gerados a partir da

interpolação dos levantamentos batimétricos anos de 1876, 1969, 1975 e 1989 e 2014 mostram variações batimétricas substanciais ao longo do canal.

A partir das simulações numéricas e das características morfológicas do ambiente estudado, foi observado que a dinâmica do estuário é sensível às mudanças em sua morfologia ao longo dos anos. Os resultados do modelo indicam que as diferenças na morfologia (batimetria) têm um papel fundamental na determinação dos padrões da circulação encontrados no sistema estuarino de Santos.

Durante o período estudado de 1876 a 2014, o SES passou por mudanças morfológicas, em especial no canal do porto de Santos, devido às dragagens. Foi observado que variações nos processos estuarinos locais ocorrem onde há mudanças na morfologia no estuário e onde existem gradientes de profundidades. Da mesma forma, em decorrência das alterações de volumes e da propagação da onda de maré ao longo do estuário, ocorrem mudanças nos padrões de circulação residual do estuário, afetando a circulação em praticamente todo o SES.

No cenário de 2014, as velocidades de corrente média foram menores e mais constantes ao longo dos principais canais (Santos, São Vicente e Bertioga) em relação aos demais cenários. As maiores velocidades de corrente são encontradas durante a maré de vazante quando comparadas com as marés de enchente, como relatado nos trabalhos de FIEDLER, (2015) e SEILER, (2019).

2. Houve alterações na morfologia estuarina após as dragagens do canal do porto de Santos?

Os mapas batimétricos gerados a partir da interpolação dos levantamentos batimétricos anos de 1876, 1969, 1975 e 1989 e 2014 mostram variações batimétricas significativas ao longo do canal do Porto de Santos. Uma análise morfológica baseada nos perfis batimétricos confeccionados indica que o efeito do processo de dragagem ao longo do canal gerou modificações morfodinâmicas no SES. O volume do canal do porto do SES aumentou 12.493.368 m³ entre 1876 a 2014, representando um aumento na capacidade do canal em torno de 28%. Este aumento do volume no canal de Santos indica o aprofundamento pelas dragagens, principalmente a partir de 1975.

3. Quais são os impactos da dragagem do canal do porto de Santos na estratificação e intrusão salina?

O cenário de 2014 apresentou menores oscilações no parâmetro de estratificação ao longo do período observado, sendo que durante a maré de sizígia apresentou valores maiores do parâmetro de estratificação e menores na quadratura, quando comparado aos demais cenários. Essa análise representa apenas um ponto no canal, que fica mais salino em virtude da intrusão salina maior nesse cenário. Conforme observado no perfil longitudinal de salinidade, ao longo do canal a estratificação aumenta com o aprofundamento no cenário de 2014, conforme esperado (e.g. Dyer, 1997; Ralston et al., 2018). Desta forma, o SES passa de um sistema dominado pelo mecanismo de bombeamento de maré, com circulação mais barotrópica antes do aprofundamento, para um sistema com importância cada vez maior da circulação gravitacional. Grasso; Le hir (2019) observaram esse mesmo fenômeno analisando a circulação do estuário do Sena (França) entre 1960 e 2010, com o aprofundamento do canal tornando os processos baroclínicos cada vez mais importantes na circulação estuarina.

4. Houve alterações no comportamento das marés do estuário devido às mudanças na morfologia ao longo dos anos?

O SES, atualmente pode ser classificado como *hipersincrônico*, ou seja, o aumento da M2 estuário adentro, no cenário de 2014 quando comparado aos demais cenários, sugere que os processos de convergência de maré estuário acima prevalecem sobre a fricção. O cenário de 2014 apresenta as maiores amplificações de amplitude de maré e assimetrias de maré no estuário. As intervenções de dragagem/aprofundamento do canal do porto de Santos contribuíram para a amplificação de maré, mudança da circulação no estuário e o aumento da assimetria de maré com predominância de maré enchente. A alteração da tensão de cisalhamento de fundo, em função do aprofundamento de canais, muitas vezes leva a alterações na amplitude de maré e mudanças de fase com o aumento da velocidade de propagação da onda de maré (Ralston et al., 2018). Esses mecanismos contribuem para um aumento no transporte residual (WINTERWERP; WANG, 2013). A amplificação da maré fortalece os transportes de maré de enchente e vazante, quando há assimetria de maré. Ou seja, um estuário com domínio de enchente se tornará mais ainda dominado por enchente.

5. Houve alterações no comportamento no transporte de águas do estuário devido às mudanças na morfologia ao longo dos anos?

Mudanças na amplitude e fase da maré no estuário, devido a redução no atrito com o fundo, alteram a circulação de todo o sistema estuarino. A circulação residual no SES é alterada como consequência das mudanças morfológicas no canal do porto, e isso se reflete no balanço de volume de água observado através da descarga cumulativa. Houve uma diminuição dos volumes de água transportados no canal de Santos entre 1876 e 2014, enquanto em São Vicente existe um aumento no volume de água transportado no mesmo período. Para o cenário de 2014 há uma tendência residual de entrada de água costeira via canal de Santos e exportação de água via canal de São Vicente e Bertioga. Em adição aos ajustes às mudanças na propagação da maré, existem também ajustes da velocidade dos fluxos no canal em função do aumento da profundidade e consequente área da seção transversal do canal de Santos. Em decorrência desses processos, existe o ajuste do sistema para o transporte do volume de água (prisma de maré) através dos outros canais, principalmente através do canal de São Vicente.

6. Houve alterações significativas nos processos estuarinos do SES durante o período de operação da Usina Hidrelétrica Henry Borden (vazão adicional no Rio Cubatão)?

Com relação à descarga cumulativa para os cenários com a vazão adicional no rio Cubatão (durante o funcionamento da Usina Henry Borden), nota-se que o padrão da circulação residual do estuário é o mesmo, quando comparado aos cenários com vazão normal. Os volumes da descarga cumulativa dos cenários com as vazões adicionais ficaram em torno de 80% acima em relação aos cenários com a vazão normal. Quando comparados os cenários com a vazão normal e adicional, quase não foram observadas diferenças nas velocidades médias seção e no ponto dos canais de Santos, São Vicente e Bertioga.

As análises dos perfis longitudinais no canal do Porto de Santos para os cenários com a vazão adicional, indicam uma maior estratificação da coluna de água (variação vertical de salinidade) em comparação aos cenários equivalentes com a vazão normal. O mesmo ocorre para o parâmetro de estratificação, nos cenários com a vazão adicional os

valores do parâmetro de estratificação ficaram em torno de 50% acima que nos cenários com a vazão normal. Ou seja, a estratificação vertical nestas condições (maior influência da descarga dos rios) é maior como esperado.

7. Quais as implicações e impactos nos processos estuarinos devido às alterações na morfologia do estuário?

De maneira geral, áreas onde há uma diminuição nas velocidades das correntes, ocorre preferencialmente uma maior deposição de sedimentos e consequentemente assoreamento. Desta forma, verifica-se que alguns cenários tendem a processos erosivos e outros a processos deposicionais. Ao longo dos anos, com a dragagem do canal de Santos, o canal ficou mais profundo e com profundidades mais constantes e consequentemente uma diminuição das velocidades das correntes tornando-se uma região propensa à deposição de sedimentos/assoreamento. Isso leva à necessidade de contínuas dragagens para a manutenção das cotas batimétricas, ou seja, mais dragagens levam a mais aprofundamento, diminuindo as velocidades das correntes, levando a mais assoreamento, levando assim a mais dragagens.

Com base nas análises de todos os cenários, observou-se que no cenário de 2014 ocorrem as maiores amplificações de amplitude de maré e assimetrias de maré no estuário. As intervenções de dragagem/aprofundamento do canal do porto de Santos contribuíram para a amplificação de maré, mudança da circulação no estuário e o aumento da assimetria de maré com predominância de maré enchente.

Os resultados da evolução hidrodinâmica do SES mostram que o gradual processo de aprofundamento do canal de Santos e Piaçagüera resultam em alterações locais de parâmetros de circulação estuarina, como a propagação da maré e estratificação da coluna de água; e também parâmetros relacionados ao sistema estuarino como um todo, como os transportes residuais de água, e consequentemente transporte de materiais, através dos canais do SES.

7.2 Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi aplicado pela primeira vez um modelo numérico para cenários morfológicos pretéritos no SES. Buscou-se cobrir uma série de variáveis físicas para a melhor avaliação das alterações batimétricas temporais sobre o SES. Assim, com base no conhecimento adquirido através da realização do presente trabalho, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros na região:

- Considerar a combinação de dados medidos in situ com modelagem numérica para a avaliação do SES. Nesse trabalho foram utilizados dados medidos nas proximidades das desembocaduras dos três canais estuarinos que compõem o sistema. Dados adicionais de outros pontos do estuário, principalmente na região do estuário superior, permitirão a melhor verificação da qualidade do modelo aplicado ao SES.
- Incluir nas simulações numéricas o transporte de sedimentos em suspensão e suas alterações devido as alterações morfológicas causadas pelas dragagens no canal. Esses resultados permitirão a avaliação do transporte residual de sedimentos no estuário, e suas alterações devido as alterações na circulação estuarina, indicando possíveis mudanças em áreas de erosão ou deposição de material.
- Realizar experimentos numéricos com modelos morfodinâmicos, de forma a avaliar a evolução morfológica gradual a partir de cada cenário considerado. Em combinação com o transporte de sedimentos, tais resultados podem fornecer informações importantes para o planejamento mais eficiente das obras de dragagem na região do canal do porto.
- Em adição aos aspectos hidrodinâmicos analisados nesse trabalho, a avaliação das implicações das alterações encontradas em processos biológicos e químicos será de grande relevância para a avaliação de impactos gerados por obras de aprofundamento de canais. Essa análise precisa ser feita de forma integrada, cobrindo toda a área do SES, e seus resultados levarão a informações relevantes que subsidiarão o manejo e tomadas de decisões em tais ambientes.

- Monitoramento contínuo de variáveis hidrodinâmicas e morfológicas no SES, permitindo a compreensão do sistema e validação de modelos numéricos hidrodinâmicos e morfodinâmicos. Em função de seu comportamento e de sua importância, o manejo do SES certamente se beneficiará de tais informações.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. A evolução geomorfológica. In: AZEVEDO, A. de (Coord.). A Baixada Santista: aspectos geográficos. São Paulo, EDUSP, 1965. v. 1, p. 49-66.

ALMEIDA, F. F. M. DE. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Revista do Instituto Geológico**, v. 39, n. 3, p. 9–75, 2018. Corrigido e republicado do: Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, nº 41, 1964.

ALMEIDA, F. F. M. Considerações sobre a geomorfogênese da serra do Cubatão. **BOLETIM PAULISTA DE GEOGRAFIA**, v. 15, p. 3–17, 1953.

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). p. 314, 2008.

BLOTT, S. J. et al. Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England. **Geomorphology**, v. 81, n. 1–2, p. 185–206, 2006.

CASSIANO, G. F.; RIBEIRO, R. B.; YASSUDA, E. A. **Acquisition of Wave Data and Modeling in Santos Bay, São Paulo, Brazil**. Proceedings of the 10th Intl. Conf.on Hydrosience & Engineering. **Anais...2012** Disponível em: <<http://mdi-de.baw.de/icheArchive/documents/2012/41238372-Final.pdf>>

CESAR, A. et al. Ecotoxicological assessment of sediments from the santos and são vicente estuarine system – Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 54, n. 1, p. 55–63, 2006.

CHAMBEL, J.; MATEUS, M. **D2 . 3 – Calibration of the hydrodynamic model for the Santos Estuary Ecomanage**. Lisboa: [s.n.].

CHENG, R. T.; CASULLI, V.; GARTNER, J. W. Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its applications to San Francisco Bay, California. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1993.

DAI, Z. et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary. **Geomorphology**, v. 187, n. June 2003, p. 101–107, 2013.

DAI, Z.; LIU, J. T.; WEN, W. Morphological evolution of the South Passage in the Changjiang (Yangtze River) estuary, China. **Quaternary International**, v. 380–381, p. 314–326, 2015.

DE VRIEND, H. J. MATHEMATICAL MODELING OF MESO-TIDAL BARRIER ISLAND COASTS Part II: Part I: EMPIRICAL AND SEMI-EMPIRICAL MODELS. **Advances in coastal and ocean engineering**, v. 2, p. 115–149, 1996.

DIAS, J. M.; VALENTIM, J. M.; SOUSA, M. C. A numerical study of local variations in tidal regime of Tagus estuary, Portugal. **PLoS ONE**, v. 8, n. 12, 2013.

DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, n. 2–3, p. 117–131, 1986.

FIEDLER, MARIA FERNANDA. **Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar : estuário de Santos , SP**. [s.l.] universidade de são paulo, 2015.

FILGUEIRA, R. et al. Storm-induced changes in coastal geomorphology control estuarine secondary productivity. **Earth's Future**, v. 2, n. 1, p. 1–6, 2014.

FONTES, J. B. F.; SCHLOESSER, M. Deepening of the Port of Santos – Brazil Dredging to Results 5 000 km surveyed. v. 1, 2012.

FUKUMOTO, M. M.; MAHIQUES, M. M.; TESSLER, M. G. Bottom faciology and sediment transport in Santos Bay, Southeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. SI 39, n. 39, p. 1737–40, 2004.

GEORGE, D. A.; GELFENBAUM, G.; STEVENS, A. W. Modeling the Hydrodynamic and Morphologic Response of an Estuary Restoration. **Estuaries and Coasts**, v. 35, n. 6, p. 1510–1529, 2012a.

GEORGE, D. A.; GELFENBAUM, G.; STEVENS, A. W. Modeling the Hydrodynamic and Morphologic Response of an Estuary Restoration. **Estuaries and Coasts**, v. 35, n. 6, p. 1510–1529, 2012b.

GOBLER, C. J. et al. Influence of freshwater flow, ocean exchange, and seasonal cycles on phytoplankton - Nutrient dynamics in a temporarily open estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 65, n. 1–2, p. 275–288, 2005.

GRASSO, F.; LE HIR, P. Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. **Ocean Dynamics**, v. 69, n. 1, p. 83–100, 2019.

HANSEN, D. V; RATTRAY, M. NEW DIMENSIONS IN ESTUARY CLASSIFICATION. **Limnology and Oceanography**, v. 11, n. 3, p. 319–326, 1966.

HARARI, J.; CAMARGO, R. DE. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 42, n. 1–2, p. 35–54, 1994.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989. **Relatório Interno do Instituto Oceanográfico**, v. 36, n. January 1995, p. 1–15, 1995.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré (Numerical modeling of the coast region of Santos (SP): tidal circulation). **Rev. bras. oceanogr**, v. 46, n. 2, p. 135–156, 1998.

HIBMA, A.; STIVE, M. J. F.; WANG, Z. B. Estuarine morphodynamics. **Coastal Engineering**, v. 51, n. 8–9, p. 765–778, 2004.

IGLESIAS, I. et al. Modelling the main hydrodynamic patterns in shallow water estuaries: The Minho case study. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 5, 2019.

JAY, D. A. et al. Tidal-Fluvial and Estuarine Processes in the Lower Columbia River : I . Along-Channel Water Level Variations , Pacific Ocean to Bonneville Dam. **Estuaries and Coasts**, v. 38, n. 2, p. 415–433, 2015.

LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. Geoquímica de sedimentos e o monitoramento de metais na Plataforma Continental Nordeste Oriental do Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 20, n. 1, p. 123–135, 2006.

LANA, P. DA C.; BERNARDINO, A. F. (EDS.). **Brazilian Estuaries, Brazilian Marine Biodiversity**. [s.l.] Springer International Publishing, 2018.

LESSER, G. R. et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal Engineering**, v. 51, n. 8–9, p. 883–915, 2004.

MIRANDA, L. B. DE et al. Circulation and salt intrusion in the Piaçagüera channel, Santos (SP). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 1, p. 11–23, 2012.

MIRANDA, L. B. DE et al. **Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography**. [s.l.] Springer, 2017. v. 8

MITCHELL, S. B. et al. Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – An introduction and synthesis. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 156, p. 1–6, 2015.

MOLLER, O. O. et al. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297–311, 2001.

NEVES, C.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias estratégicas**, p. 217–295, 2008.

NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Estuaries. In: DAVIS, R. A. (Ed.). **Coastal Sedimentary Environments**. New York, NY: Springer New York, 1985. p. 77–186.

NICOLITE, M. et al. Oscilação do nível de água e a co-oscilação da maré astronômica no baixo estuário do rio Paraíba do sul RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 2, p. 225–239, 2009.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. **Computers and Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929–937, 2002.

PERRELS, P. A. J.; KARELSE, M. A TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR SALT INTRUSION IN ESTUARIES. **Elsevier Oceanography Series**, v. 23, p. 107–125, 1978.

PHILIPS, E. J. et al. Climatic Influences on Autochthonous and Allochthonous Phytoplankton Blooms in a Subtropical Estuary, St. Lucie Estuary, Florida, USA. **Estuaries and Coasts**, v. 35, n. 1, p. 335–352, 2012.

PRITCHARD, D. W. **Observations of circulation in coastal plain estuaries** Estuaries Washington DC Am Assoc Adv Sci, , 1967.

RAGNEV, W. Estudo de Potência Reativa, Tensão, Contingências e Perdas em Empresas de Energia Elétrica Localizadas na Grande São Paulo. p. 125, 2005.

RALSTON, D. K. et al. Bigger Tides, Less Flooding: Effects of Dredging on Barotropic Dynamics in a Highly Modified Estuary. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 124, n. 1, p. 196–211, 2018.

RANASINGHE, R. et al. Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 1, p. 83–87, 2012.

SAMPAIO, A. F. P. Avaliação da correlação entre parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos - São Vicente, através de modelagem numérica ambiental. **Dissertação**, p. 171, 2010.

SEILER, L. M. N. **Hidrodinâmica e comportamento de variáveis indicadoras da qualidade da água no complexo estuarino de Santos-São Vicente- Bertioga : uma abordagem numérica**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2019.

SILVA, G. C. DA; VAZ-DOS-SANTOS, A. M.; MARACINI, P. Análise De Encalhes De Tartarugas Marinhas (Testudi- Nes : Cheloniidae E Dermochelyidae) Nos Municípios Da Baixada Santista , Iguape E Cananéia No Período De 2004. **Revista Ceciliana**, v. 4, n. 2, p. 9–15, 2012.

SOUZA, C. M. M. A. DE. **Caracterização hidrodinâmica da Baía e Estuário Santista utilizando a modelagem numérica**. [s.l.] universidade estadual de campinas, 2012.

SUTHERLAND, J. et al. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. **Coastal Engineering**, v. 51, n. 2, p. 119–142, 2004.

TALKE, S. A. et al. An Idealized Model and Systematic Process Study of Oxygen Depletion in An Idealized Model and Systematic Process Study of Oxygen Depletion in Highly Turbid Estuaries. **Estuaries and Coasts**, v. 32, n. July, p. 602–620, 2009.

THOMAS, C. G.; SPEARMAN, J. R.; TURNBULL, M. J. Historical morphological change in the Mersey Estuary. **Continental Shelf Research**, v. 22, n. 11–13, p. 1775–1794, 2002.

TOLDO JR, E. et al. Sedimentação de Longo e Curto Período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 79, 2006.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essentials of oceanography**. 12th. ed. [s.l.] Pearson Education, Inc, 2017a.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essential Of Eceanography**. [s.l: s.n.]. v. 2048

VALLE-LEVINSON, A. **Contemporary issues in estuarine physics**. [s.l.] Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2010.

VAN MAREN, D. S. et al. The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. **Continental Shelf Research**, v. 95, p. 1–14, 2015.

VILES, H. A.; FRENCH, P. W. **Coastal and Estuarine Management**. [s.l: s.n.]. v. 165

WALKER, R. G. Facies Models Revisited. In: **Facies Models Revisited**. [s.l.] SEPM (Society for Sedimentary Geology), 2011. p. 1–17.

WALSTRA, D. J. R. et al. **Verification and comparison of two hydrodynamic area models for an inlet system**. Coastal Dynamics 2001. **Anais...**2001

WILLIAMS, P. B.; ORR, M. K.; GARRITY, N. J. Hydraulic geometry: A geomorphic design tool for tidal marsh channel evolution in wetland restoration projects. **Restoration Ecology**, v. 10, n. 3, p. 577–590, 2002.

WINTERWERP, J. C.; WANG, Z. B. Man-induced regime shifts in small estuaries - I: Theory. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 11–12, p. 1279–1292, 2013.

ZUNDT, C. Expansão Metropolitana, Mobilidade espacial e segregação nos anos 90. In: CUNHA, J. M. P. (Ed.). . Campinas: Núcleo de Estudos de População, Universidade Estadual de Campinas, 2006. p. 305–363.