

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL –  
PPGEA

MAURO MASSANARI TAMURA

**O PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO NO CANAL DE ACESSO AOS  
PORTOS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

CURITIBA  
2017

MAURO MASSANARI TAMURA

**O PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO NO CANAL DE ACESSO AOS  
PORTOS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Engenharia Ambiental, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha

CURITIBA  
2017

---

T159p

Tamura, Mauro Massanari

O processo de sedimentação no canal de acesso aos portos do Complexo Estuarino de Paranaguá / Mauro Massanari Tamura. – Curitiba, 2017.  
94 f ; il. color : 30 cm.

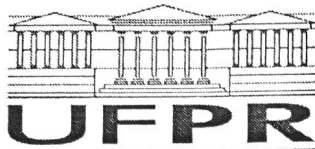
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2017.

Orientador: Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha  
Bibliografia: p. 90-94.

1. Transporte de sedimentos. 2. Erosão. 3. Sedimentos (Geologia). 4.  
SisBAHIA®. 5. Erosão - Complexo Estuarino de Paranaguá (PR). 6.  
Sedimentos - Complexo Estuarino de Paranaguá (PR). I. Universidade  
Federal do Paraná. II. Cunha, Cynara de Lourdes da Nóbrega. III. Título.

CDD: 551.35

---




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
Setor TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL

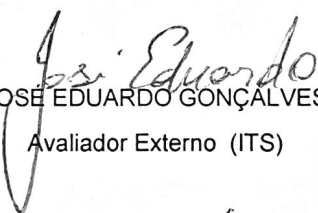
## TERMO DE APROVAÇÃO

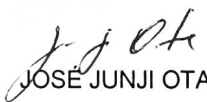
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MAURO MASSANARI TAMURA** intitulada: "O Processo de Sedimentação No Canal De Acesso Aos Portos Do Complexo Estuarino de Paranaguá", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

Aprovação

Curitiba, 21 de Fevereiro de 2017.

  
CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
JOSE EDUARDO GONÇALVES  
Avaliador Externo (ITS)

  
JOSE JUNJI OTA  
Avaliador Externo (UFPR)



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus Supremo por ser onipresente, e ter me concedido esta oportunidade de cursar o mestrado em engenharia ambiental.

Agradeço a orientadora Professora Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha pela orientação sempre competente e segura, demonstrando uma excelente orientadora, pela confiança que me depositou durante todo o período de estudo, pela compreensão, pelo apoio e incentivo em todos os momentos difíceis, e por ter se tornado, para mim, uma referência nos aspectos pessoal e profissional.

Agradeço a minha família, por todo apoio dado e que tanto me ajudaram e foram compreensivos.

Agradeço a Sarah pelo carinho, incentivo e paciência, me dando forças, e a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

*“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”.*

Jean Cocteau

## RESUMO

O presente trabalho desenvolve a modelagem computacional no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizado no litoral paranaense, usando o sistema SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), com o objetivo de avaliar o processo de erosão e sedimentação no canal de acesso aos portos do CEP, usando como fonte de sedimentos coesivos o aporte fluvial e considerando ainda a movimentação do sedimento de fundo. Neste sentido, é usado o modelo de transporte euleriano do SisBaHiA<sup>®</sup> acoplado ao modelo de circulação hidrodinâmica. Na calibração do modelo de circulação hidrodinâmica são usados dados de campo medidos em diversos pontos da baía para o ano de 2009; o modelo é validado com dados de 2011, apresentando uma boa concordância. O transporte do material particulado em suspensão (MPS), juntamente com a movimentação do fundo, são realizados para um período de 30 anos, considerando ciclos de circulação hidrodinâmica de um ano. Primeiramente verificou onde o MPS tende a se depositar. Posteriormente foi observado o potencial da circulação hidrodinâmica em movimentar o sedimento do fundo, usando a formulação proposta por Van Rijn (1984). Por fim, para analisar o processo de erosão e sedimentação no canal de acesso aos Portos do CEP, são observadas as alterações batimétricas com o depósito do MPS oriundos dos rios e a movimentação do material do fundo. Possivelmente o canal de acesso aos portos não recebe os sedimentos oriundos dos rios afluentes, sendo possível destacar os locais de deposição e erosão na região do canal da Galheta.

Palavras-chave: SisBAHIA<sup>®</sup>, Complexo Estuarino de Paranaguá, Transporte de Sedimentos, Material Particulado em Suspensão.

## ABSTRACT

This paper develops the computational modeling in Estuarine Complex of Paranaguá (CEP), located on the coast of Paraná, using the SisBaHiA<sup>®</sup> system (in Portuguese, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), in order to evaluate the erosion and sedimentation process in the channel of access to the ports of the CEP, using as a source of cohesive sediments the fluvial contribution and considering also the movement of the bottom sediment. In this sense, it is used the Eulerian Transport model of SisBaHiA<sup>®</sup> coupled to hydrodynamic circulation model. On calibration of hydrodynamic circulation model used field data measured at various points of the bay for the year 2009; the model is validated with data from 2011, presenting a good agreement. The transport of particulate matter in suspension (MPS) along with the bed load is carried out for a period of 30 years, considering hydrodynamic circulation cycles a year. First it was found where MPS tends to deposit. Later it was observed the hydrodynamic circulation potential in moving the sediment of the fund, calculated on the basis of the wording proposed by Van Rijn (1984). Finally, to analyze the process of erosion and sedimentation in the channel of access to the ports of CEP, the bathymetric changes with the deposit of the MPS from the rivers and the movement of the material of the bottom. Possibly the access channel to the ports does not receive the sediments originating from the tributary rivers, being possible to highlight the places of deposition and erosion in the region of the Galheta channel.

Keywords: SisBAHIA<sup>®</sup>, Estuarine Complex of Paranaguá, Sediment Transport, Suspended Particulate Matter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho.....	35
Figura 2 – Localização da área de estudo – Complexo Estuarino de Paranaguá. .....	37
Figura 3 – Localização da estação no canal da Coatinga. ....	40
Figura 4 – Posição da superfície livre no canal da Coatinga, com a indicação dos instantes quando foram realizadas medições dos perfis de temperatura. .	40
Figura 5 – Perfis de temperatura nos período de quadratura (a) e sizígia (b) na região do canal da Coatinga.....	41
Figura 6 – Batimetria do Complexo Estuarino de Paranaguá usada neste trabalho. ....	42
Figura 7 – Regiões com diferentes levantamentos batimétricos, com destaque para o canal de acesso ao porto de Paranaguá.....	42
Figura 8 – Carta Náutica de nº 1820. ....	43
Figura 9 – Carta Náutica de nº 1821. ....	43
Figura 10 – Carta Náutica de nº 1822. ....	44
Figura 11 – Amplitude da rugosidade de fundo (m) no Complexo Estuarino de Paranaguá.....	45
Figura 12 – Caracterização das regiões a partir do tipo de sedimento com limite de tensão crítica de mobilidade ( $N/m^2$ ) no Complexo Estuarino de Paranaguá. .....	45
Figura 13 – Localização dos rios afluentes ao CEP, localização e o código das estações, segundo o <i>Hidroweb</i> . ....	46
Figura 14 – Curva de maré prevista para o ano de 2009, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por Marone e Jamiyanna (1997) e FEMAR.	48
Figura 15 – Curva de maré prevista para o ano de 2011, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por Marone e Jamiyanna (1997) e FEMAR.	49
Figura 16 – Rosa de distribuição dos ventos na estação da Ilha do Mel para o ano de 2009. ....	49
Figura 17 – Rosa de distribuição dos ventos na estação da Ilha do Mel para o ano de 2011. ....	50
Figura 18– Discretização do domínio do Complexo Estuarino de Paranaguá, com a localização dos principais rios afluentes ao CEP. ....	52
Figura 19 – Localização da estação Est_N, onde dados de níveis (quadrado) e a Est_C, onde dados de corrente (círculo) foram medidos e usados no processo de calibração. ....	54

Figura 20 – Localização das estações onde dados de níveis foram medidos para o processo de validação: porto de Paranaguá (cruz) e a Ponta do Félix (triângulo). .....	55
Figura 21 – Localização das estações no canal da Galheta para observação dos processos de sedimentação e/ou erosão. ....	57
Figura 22 – Localização das estações dos dados obtidos pela simulação do modelo de circulação hidrodinâmico durante o ano de 2009. ....	59
Figura 23 – Posição da superfície livre (m) obtidas pelo SisBAHIA® nas estações Est_1, Est_2, Est_3, Est_4, em detalhe entre 16/06/2009 e 26/06/2009. ....	59
Figura 24 – Componentes de velocidades Leste-Oeste obtidas pelo SisBAHIA, em m/s, nas estações Est_1, Est_2, Est_3, Est_4, no período entre 16/06/2009 e 26/06/2009. ....	60
Figura 25 – Componentes de velocidades Norte-Sul obtidas pelo SisBAHIA, em m/s, nas estações Est_1, Est_2, Est_3, Est_4, no período entre 16/06/2009 e 26/06/2009. ....	60
Figura 26 – Campo de corrente no domínio do modelo no instante de meia maré enchente no dia 21/06/2009 às 13:00, com destaque para a região da baía de Paranaguá, mostrando a componente Leste-Oeste mais significativa que a Norte-Sul. ....	61
Figura 27 – Campo de corrente no domínio do modelo no instante de meia maré vazante no dia 20/06/2009 às 17h00min, com destaque para a região da baía de Paranaguá, mostrando a componente Leste-Oeste mais significativa que a Norte-Sul. ....	61
Figura 28 – Posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos (Est_N), no período de quadratura.....	62
Figura 29 – Posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos (Est_N), no período de sizígia.....	63
Figura 30 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos (Est_N), no período de quadratura. ....	63
Figura 31 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA®, e os dados medidos (Est_N), no período de sizígia. ..	64
Figura 32 – Valores medidos da pressão atmosférica, em hPa, no eixo esquerdo (azul), velocidade do vento, em m/s, no eixo direito superior (verde) e temperatura do ar, em °C, no eixo direito inferior (vermelho) entre os 01/03/2009 e 31/03/2009. ....	65
Figura 33 – Componente da velocidade (m/s) Leste-Oeste obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos (Est_C), no período de quadratura. ....	66

Figura 34 – Componente da velocidade (m/s) Leste-Oeste obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos (Est_C), no período de sizígia.....	66
Figura 35 – Comparação da posição da superfície livre obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos, próximo ao Porto da Ponta do Félix. ....	67
Figura 36 – Comparação da posição da superfície livre obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos, próximo ao Porto de Paranaguá.....	68
Figura 37 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos próximo ao Porto da Ponta do Félix. ....	68
Figura 38 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA® e os dados medidos próximo ao Porto de Paranaguá. ....	69
Figura 39 – Comparação da variação da batimetria, em metros, com velocidade de sedimentação variável (esquerda) e velocidade de sedimentação constante de 0,5 mm/s (direita) após 1 ano, 10 anos, 20 anos e 30 anos de simulação (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).....	71
Figura 40 – Localização das estações dos locais da variação da batimetria e concentração.....	72
Figura 41 – Variação da batimetria, em metros, após 30 anos de simulação, com velocidade de sedimentação variável (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).....	72
Figura 42 – Variação da batimetria, em metros, após 30 anos de simulação com velocidade de sedimentação constante de 0,5 mm/s (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).....	73
Figura 43 – Diferença da variação da batimetria, em metros, com velocidade de sedimentação constante e variável. ....	74
Figura 44 – Distribuição de concentrações de material particulado em suspensão, em mg/L, ao final do primeiro ano.....	75
Figura 45 – Distribuição de concentrações de material particulado em suspensão, em mg/L, após 30 anos.....	75
Figura 46 – Concentração de material particulado em suspensão, em mg/L, após 30 anos nas estações indicadas na Figura 40.....	76
Figura 47 – Persistência da tensão de fundo > 0,1532 N/m <sup>2</sup> , valor capaz de movimentar areia muito fina e silte, com destaque para a zona de máxima turbidez. ....	78
Figura 48 – Persistência da tensão de fundo > 0,1696 N/m <sup>2</sup> , valor capaz de movimentar areia fina.....	79
Figura 49 – Persistência da tensão de fundo > 0,2116 N/m <sup>2</sup> , valor capaz de movimentar areia média.....	80

Figura 50 – Persistência da tensão de fundo > 0,363 N/m <sup>2</sup> , valor capaz de movimentar areia grossa.....	81
Figura 51 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em N/m <sup>2</sup> , na estação CG_1 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).....	83
Figura 52 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em N/m <sup>2</sup> , na estação CG_2 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).....	84
Figura 53 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em N/m <sup>2</sup> , na estação CG_3 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).....	84
Figura 54 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em N/m <sup>2</sup> , na estação CG_4 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).....	84
Figura 55 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em N/m <sup>2</sup> , na estação CG_5 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).....	85
Figura 56 – Variação da batimetria, em metros, ao final de 30 anos de simulação no Complexo Estuarino de Paranaguá com a formulação de Van Rijn (1984), com a vazão sólida dos rios e a movimentação do material do fundo (valores negativos apresentam a deposição, e os valores positivos, erosão)..	87



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de valores de tensão crítica de mobilidade, do parâmetro de Shields em função do diâmetro e do diâmetro em unidades $\phi$ , para diferentes tipos de areia com massa específica $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ , $\rho_o = 998,1 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade cinemática $\nu = 1.05E^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ .....	29
Tabela 2 - Fórmulas de transporte de sedimentos, com faixa de granulometria recomendável e o tipo de transporte. ....	30
Tabela 3 - Vazões médias mensais ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) do ano de 2009 utilizadas para a modelagem da circulação hidrodinâmica do CEP. ....	47
Tabela 4 - Vazões médias mensais ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) do ano de 2011 utilizadas para a validação do modelo da circulação hidrodinâmica. ....	47
Tabela 5 – Amplitude e fase das constantes harmônicas próximo ao porto de Paranaguá.....	48
Tabela 6 - Concentrações do material suspenso utilizadas para a modelagem do transporte de sedimentos coesivos no CEP.....	51
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no modelo de circulação hidrodinâmica para o ano de 2009. ....	58

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Objetivo geral .....	15
1.1.1	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Estuários.....	17
2.1.1	Classificação dos estuários .....	18
2.2	A circulação hidrodinâmica .....	19
2.3	Transporte de sedimentos .....	20
2.4	Uso de modelos para a quantificação do transporte de sedimentos ...	22
2.5	SISBAHIA® - Sistema base de hidrodinâmica ambiental .....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
3.1	Área de estudo .....	36
3.1.1	Características gerais.....	36
3.1.2	Características climáticas.....	37
3.1.3	Características hidrográficas .....	38
3.1.4	Dinâmica hídrica.....	38
3.2	Batimetria .....	41
3.3	Sedimento do fundo.....	44
3.4	Vazão dos rios.....	46
3.5	Maré .....	47
3.6	Vento .....	49
3.7	Material em suspensão nos rios afluentes.....	50
3.8	Etapa 1: aplicação do modelo de circulação hidrodinâmico .....	51
3.9	Etapa 2: calibração e validação do modelo .....	53
3.10	Etapa 3: aplicação do modelo de transporte euleriano.....	55
4	RESULTADOS.....	58
4.1	Etapa 1: aplicação do modelo de circulação hidrodinâmico .....	58
4.2	Etapa 2: calibração e validação do modelo .....	62
4.3	Etapa 3: aplicação do modelo de transporte euleriano.....	69
5	CONCLUSÕES.....	88
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

## 1 INTRODUÇÃO

Regiões costeiras são locais onde a abundância de recursos naturais e a grande diversidade ecológica atrai a ocupação humana. Conseqüentemente, grandes centros urbanos se formaram nessas regiões. Devido aos seus atributos e características, esses locais são utilizados para a atividade petrolífera, agricultura e agroindústria, aquicultura, extração de minérios e vegetal, pesca, reflorestamento, pecuária, recreação e urbanização. Além disso, nessas regiões encontram-se baías e estuários, ambientes ideais para as instalações portuárias.

A presença dos portos resulta em um intenso tráfego de embarcações de grande e pequeno porte. No entanto, apesar de possuir uma área favorável às atividades portuárias, muitas vezes é necessária a dragagem dos canais para permitir o acesso ao interior das baías e estuários, e devido às modificações impostas pelas dragagens, pode ocorrer assoreamento e erosão na região próxima ao canal dragado. Sendo assim, quando ocorre assoreamento, é necessário manter os canais de acesso com profundidades adequadas por meio das operações de dragagens, que constitui uma atividade de alto custo e prejudicial ao meio ambiente.

Os sistemas estuarinos são frágeis devido às suas complexas interações entre os aspectos físicos, químicos, biológicos e geológicos. O estudo da circulação hidrodinâmica destes sistemas é essencial na manutenção de seus ecossistemas e está interligado, principalmente, a fatores oceanográficos, geológicos e meteorológicos (RIBAS, 2004). Desta forma, estudos sobre a circulação hidrodinâmica estuarina são necessários e de grande importância para a quantificação do transporte de sedimentos e suas conseqüências, considerando que a movimentação das partículas depende de um balanço de forças gerado pela circulação hidrodinâmica.

Uma das ferramentas utilizadas para esses estudos é a modelagem ambiental. O uso de modelos computacionais é importante para a gestão de recursos hídricos, pois permite definir o comportamento real de um corpo hídrico, podendo reduzir os custos, tempo de trabalho e prever situações futuras. Ademais, essa ferramenta é muito usada em estudos da circulação

hidrodinâmica em baías e estuários, e suas implicações no transporte de sedimentos.

Uma das ferramentas que atende a essas finalidades é o SisBaHiA<sup>®</sup> - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, que foi desenvolvido pela COPPE/UFRJ. Este sistema é constituído por um conjunto de modelos, entre os quais destaca-se o de circulação hidrodinâmica para corpos de água rasos, o de transporte euleriano, o de qualidade de água e eutrofização e o de transporte Lagrangeano.

O presente trabalho mostra o desenvolvimento da modelagem da circulação hidrodinâmica bidimensional e do transporte euleriano, realizado de forma acoplada, no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). O CEP está localizado no litoral do Paraná, na região sul do Brasil, é composto por dois corpos d'água principais: as baías de Paranaguá e Antonina (eixo Leste-Oeste) e as baías de Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros (eixo Norte-Sul), totalizando uma área de aproximadamente 612 km<sup>2</sup> (LANA et al., 2001). O porto Barão de Tefé, hoje desativado, os Terminais Portuários da Ponta do Félix S.A. e o Porto de Paranaguá localizam-se na Baía de Paranaguá. A existência destes terminais portuários ao longo do eixo Leste-Oeste do CEP exige manutenção constante do canal de acesso, possivelmente devido a sedimentação, dos sedimentos oriundos dos rios, e a movimentação dos sedimentos do fundo, que provocam constantes modificações. As simulações foram realizadas para um período de trinta anos; um intervalo de tempo suficiente para verificar a variação da batimetria no Complexo Estuarino de Paranaguá e assim, identificar qual a origem do sedimento que provoca o assoreamento do canal de acesso aos portos do CEP.

## **1.1 Objetivo geral**

O objetivo do trabalho é avaliar o processo de erosão e sedimentação no canal de acesso aos portos do Complexo Estuarino de Paranaguá, usando como fonte de sedimentos coesivos o aporte fluvial e considerando ainda a movimentação do sedimento de fundo, usando como ferramenta computacional o modelo SisBaHiA<sup>®</sup>.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Levantamentos dos dados necessários para a simulação do modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional do SisBAHIA<sup>®</sup>;
- Aplicação do modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional do SisBAHIA<sup>®</sup> para todo o ano de 2009; neste ano existem dados disponíveis de níveis d'água e das componentes de velocidade, possibilitando assim a calibração do modelo neste período;
- Validação do modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional do SisBAHIA<sup>®</sup>, com dados disponíveis de níveis d'água do ano de 2011;
- Aplicação do modelo de transporte euleriano do SisBAHIA<sup>®</sup> para verificar o transporte de sedimentos coesivos e não coesivos;
- Análise do processo da evolução morfológica do canal de acesso aos portos do CEP após um período de 30 anos de simulação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estuários

Estuários são ambientes costeiros semifechados, de transição entre o oceano e o continente, ou seja, onde os rios encontram o mar, resultando em uma mensurável diluição da água salgada. Possuem grande importância em aspectos ecológicos, econômicos e sociais (MIRANDA et al., 2012).

Silva (2011) mostra que o ambiente estuarino pode ser dividido em três zonas, com base na interação entre a vazão fluvial e o prisma de maré:

- zona estuarina fluvial, região onde a salinidade das águas é próxima a zero, mas ainda apresenta influência da maré;
- zona de turbidez máxima, normalmente na região da mistura da água doce com a água do mar;
- zona estuarina costeira, localizada na região costeira adjacente onde a salinidade coincide com a salinidade oceânica.

Além disso, estuário é um sistema aberto e é tido como uma região de acesso para os animais que se deslocam entre os rios e o mar. Portanto, constitui habitat natural para mamíferos, aves, peixes, atendendo suas necessidades como proteção, alimentação, reprodução e crescimento e sendo locais de desova de várias espécies de peixes de grande valor comercial (BRAGA, 2000).

Segundo Moraes (2007), como consequência da crescente expansão de cidades litorâneas e portuárias, houve o aumento da exploração de atividades em complexos industriais instalados nas proximidades dos estuários, indústrias pesqueiras, entre outras.

As zonas estuarinas, por serem áreas privilegiadas para a fixação de portos, resultam em um intenso tráfego de embarcações de grande e pequeno porte. Sendo assim, é necessária a manutenção dos canais de navegação em certas zonas portuárias sujeitas ao assoreamento, com a realização periódica de operações de dragagem para garantir o bom funcionamento dos canais de navegação.

O assoreamento em estuários pode ocorrer devido à erosão em determinadas regiões do sedimento de fundo e, ainda, pelo carregamento do

sedimento fluvial ou marítimo. O estuário atua como um filtro, retendo o sedimento mais grosso e expulsando os sedimentos finos (ANTUNES, 2013). Pelos estuários pode ocorrer o transporte dos sedimentos do continente em direção ao oceano e da região costeira adjacente para o interior das regiões estuarinas e, ao longo desses processos, ocorre uma contínua sedimentação e/ou erosão (NICHOLS & BIGGS, 1985).

### 2.1.1 Classificação dos estuários

É possível classificar os estuários com base nas variações da densidade da água, das características geomorfológicas e da amplitude de maré da área oceânica adjacente. Porém, não existe um consenso de qual classificação é a mais completa.

Segundo Dyer (1997), quando as vazões fluviais são maiores que o prisma de maré, o estuário é classificado como altamente estratificado. Neste tipo de estuário, a salinidade das águas de superfície é bem menor que a do fundo. Isto resulta no transporte da maior parte dos sedimentos provenientes dos rios para a região oceânica na camada superior e pouca sedimentação dentro do corpo estuarino.

Quando o prisma de maré é mais importante que a vazão fluvial, o estuário é classificado como bem misturado. Neste tipo de ambiente o perfil de salinidade é homogêneo na direção vertical, ou seja, a salinidade das águas superficiais é igual a do fundo. A salinidade da água só varia nas direções horizontais, sendo maiores nas regiões oceânicas e menores próximos ao continente.

Quando as forçantes são compatíveis, o estuário é classificado como parcialmente misturado. Neste estuário o aumento de salinidade ocorre de maneira gradativa tanto nas direções horizontais como na vertical.

É importante destacar que, como as circulações das águas dos estuários dependem das condições hidrodinâmicas dominantes, por exemplo, um estuário parcialmente misturado pode se tornar em um bem estratificado, uma consequência direta da mudança da vazão fluvial em um período de grande precipitação. Além disso, um estuário pode apresentar dois tipos distintos de estratificação das suas águas simultaneamente (MIRANDA et al.,

2002). Como exemplo, a Baía de Guanabara apresenta, na região próxima a ponte Rio–Niterói, águas parcialmente misturadas, enquanto em sua entrada, pode ser classificada como bem misturada.

## 2.2 A circulação hidrodinâmica

A circulação hidrodinâmica dos estuários depende principalmente da descarga fluvial, da maré e do vento. Somam-se ainda as funções motrizes influenciadas pela geometria e batimetria do corpo estuarino, gradientes de salinidade e circulação da região costeira adjacente. Comumente um destes três forçantes de circulação predomina num certo estuário, entretanto dois ou mais podem ser observados simultaneamente num mesmo estuarino (KJERFVE, 1988).

A água doce e os gradientes longitudinais de salinidade, gerados pela diluição da água salgada do oceano, são fundamentais para a dinâmica do estuário e, como consequência, para os processos de transporte de sedimentos e mistura que ocorre em seu interior. A diferença de densidade entre a água doce e salgada tende a manter a estratificação do sistema (MIRANDA et al., 2002). De maneira oposta, o vento e a maré atuam no sentido de homogeneizar a coluna d'água.

A maré astronômica é dominante para gerar movimentos e mistura nos estuários, envolvendo intensos processos advectivo e difusivo, variáveis espacialmente e fortemente condicionados pela geometria. A maré é gerada pelas forças de atração gravitacional da Lua com o Sol, associadas à aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas de água das bacias oceânicas (PARKER, 1991). Os movimentos horizontais da água são conhecidos como corrente de maré, têm a mesma periodicidade das oscilações verticais, mas tendem a seguir uma elíptica que normalmente não se resume a um simples movimento de ir e vir. Em corpos de água rasos, o efeito da fricção no fundo e a presença de ilhas em contornos de terra podem modificar este padrão de movimento.

O método mais usual para a previsão de altura de maré é o método harmônico, esse método baseia na soma da maré observada com componentes de período de um dos movimentos astronômicos relativos entre a



Terra, Lua e Sol. Cada componente tem uma fase e uma amplitude para um determinado local (XAVIER, 1996).

O vento é uma forçante que promove a aeração e a mistura das massas de água estuarina e gera correntes superficiais. Além de atuar na geração de turbulência e de correntes superficiais.

A maré meteorológica é definida como sendo a diferença entre a maré medida e a maré astronômica. Essa desigualdade é causada pelas variações da pressão atmosférica e a troca de *momentum* entre a atmosfera e a superfície do oceano. Em geral, os efeitos devidos unicamente pela ação da pressão atmosférica são de aproximadamente 10% do efeito total observado, o restante devido exclusivamente à tensão de cisalhamento do vento na superfície do oceano (PUGH, 1996).

O papel do vento na mudança do nível do mar está relacionado, fundamentalmente, à transferência de energia e *momentum* das massas de ar em movimento para a água. É preciso que o vento se mantenha por determinado tempo, de modo que possa ser transferida energia suficiente para que o efeito seja predominante (MARONE, 1991). Este processo se encontra na origem da formação de correntes e de ondas geradas pelo vento, fenômeno potencialmente causador de marés meteorológicas. O efeito da pressão atmosférica sobre o nível do mar é chamado de efeito do barômetro invertido, segundo o qual, a um determinado aumento da pressão atmosférica corresponderá uma diminuição no nível do mar. Assim, com a diminuição na pressão atmosférica, ocorre a elevação do nível do mar (NUNES, 2007).

A maré meteorológica é o responsável pela diminuição ou aumento do nível do mar em relação às marés astronômicas observadas num dado local. Este fenômeno é geralmente mais importante quando os registros são maiores do que aqueles previstos pela maré astronômica, o que ocasiona em intrusão de água do mar em locais que normalmente não acontece, podendo causar inundações (MARONE & CAMARGO, 1994).

### **2.3 Transporte de sedimentos**

O transporte de sedimentos é um fenômeno natural que pode alterar paisagens, originando as formas geomorfológicas. Por exemplo, os rios são os

grandes receptores e transportadores dos sedimentos provenientes da erosão dos solos e, os oceanos, são os grandes receptores finais, com a possibilidade de formação de ilhas nos estuários e deltas (CARVALHO e CUNHA *apud* BICALHO, 2006). Mudanças na morfologia dos estuários são geradas pela variação espacial média do transporte de sedimentos em suspensão considerada sobre um período representativo de tempo. Portanto, gradiente positivo ou negativo na taxa de transporte ocasiona a erosão ou deposição de material no leito de fundo (DYER, 2000).

A força da gravidade e a tensão de cisalhamento são os principais fatores que atuam sobre a dinâmica hídrica. A tensão de cisalhamento é o fator mais importante para iniciar o movimento das partículas. A força de arraste traduz a resistência ao movimento próximo ao fundo que exerce uma força da mesma magnitude nos sedimentos do fundo. Assim, a tensão de cisalhamento tem um papel decisivo para a caracterização da circulação hidrodinâmica e o transporte de sedimentos, principalmente em corpos d'água rasos. A sua magnitude depende da viscosidade do fluido e da rugosidade do fundo. A rugosidade do fundo está associada ao tipo de grãos presentes no leito ou as formas no fundo, como rugas ou dunas (ROSENHAGEN, 2013).

Os sólidos presentes na água podem ser classificados dependendo das suas características físicas ou químicas. Referente às características físicas podem ser classificados em sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos e sólidos coloidais. Em relação às características químicas, podem ser sólidos orgânicos e inorgânicos (VON SPERLING, 1996).

Partículas muito finas são caracterizadas como sedimentos coesivos e os sedimentos maiores são chamados de sedimentos não coesivos. O sedimento coesivo dissolvido é transportado por advecção e difusão turbulenta; o destino final dos materiais finos em suspensão é determinado pelos processos de sedimentação e deposição. A erosão ocorre quando a tensão de cisalhamento estiver acima de um determinado valor crítico, enquanto a deposição ocorre quando a tensão de cisalhamento estiver menor que um valor crítico (FALKENBERG, 2009). A sedimentação dos materiais particulados em suspensão (MPS) também depende de seu tamanho e densidade, e é facilitada com a formação de flocos, que depende das propriedades químicas e físicas do sedimento, da salinidade e da turbulência presente no corpo d'água.

A alta concentração de MPS favorece o processo de floculação e, conseqüentemente, eleva a velocidade de queda das partículas. Concentrações muito baixas de MPS, o processo de floculação pode ser muito lento, com pouca variação do tamanho do floco na coluna d'água e, conseqüentemente, uma mínima variação da velocidade de queda (FALKENBERG, 2009).

As partículas não coesivas possuem tamanho maior e movimentam-se por arraste, salto ou suspensão. Quando a tensão de cisalhamento de fundo excede um valor crítico, começa o movimento dos sedimentos de fundo por rolamento ou arraste, em contato com o solo. Conforme a velocidade de cisalhamento de fundo aumenta, as partículas passam a se mover por saltos. Se a velocidade de cisalhamento de fundo excede a velocidade de queda do sedimento, as partículas podem ser elevadas a um nível em que as forças turbulentas ultrapassam a força do peso submerso das partículas, ocasionando a movimentação por suspensão (VAN RIJN, 1993).

#### **2.4 Uso de modelos para a quantificação do transporte de sedimentos**

As primeiras equações usadas na modelagem matemática do transporte de sedimentos surgiram nos anos 1950, baseadas em experimentos de laboratório. Com o passar dos anos, os modelos foram se sofisticando, resultando na criação dos modelos de duas e três dimensões, usados atualmente (WANG & WU, 2004).

Várias fórmulas são encontradas na literatura para descrever o transporte de sedimentos, baseadas em diversos tipos de experimento. A escolha da fórmula adequada deve ser realizada de modo criterioso, pois geralmente foram desenvolvidas por métodos empíricos ou semi-empíricos, considerando as condições específicas dos experimentos.

Atualmente existe uma grande quantidade de modelos destinados para o cálculo da descarga sólida. Esses modelos podem se diferenciar em termos de complexidade, dos processos considerados e de dados necessários para a calibração. De maneira geral não existe o melhor modelo, isso dependerá do uso e das características consideradas (YANG & SIMÕES, 2008).

Merrit (2003) aponta alguns fatores que devem ser observados na escolha do melhor modelo para quantificar o transporte de sedimentos, dependendo dos objetivos do uso do modelo: facilidade de utilização do modelo; escalas temporais e espaciais das saídas do modelo; e requisitos de *hardware* do modelo.

O uso de ferramentas matemáticas e computacionais permite o diagnóstico dos problemas referentes aos processos de sedimentação, em virtude da complexidade da solução dada pelas variáveis envolvidas. É importante destacar que a simplicidade ou a complexidade de um modelo de transporte de sedimentos são relativas ao estudo; modelos muito simples podem gerar resultados distorcidos em relação aos dados observados em campo. Os modelos com muita complexidade podem apresentar dificuldades na definição dos parâmetros de entrada, calibração do modelo, entre outros; dessa forma, também pode apresentar resultados equivocados.

É possível encontrar diversos modelos de transporte de sedimentos na literatura que estudam o comportamento dos sedimentos em corpos d'água. DELFT-3D é um modelo desenvolvido pelo *WL Delf Hydraulics* na Holanda. É composto por vários módulos: de circulação hidrodinâmica, de propagação de onda, transporte de sedimentos, de evolução morfológica, de qualidade da água e eutrofização. Garcia (2008) utilizou o modelo DELFT-3D para estudar o transporte de sedimentos e identificar áreas que apresentam os maiores percentuais de erosão e deposição, no reservatório de Itaipu. Os resultados mostram que apresentaram deposição e erosão somente na região de início do reservatório devido a maior intensidade do fluxo e que os sedimentos que chegam até a barragem representam as partículas mais finas do material suspenso que não depositou anteriormente.

O MOHID é um modelo desenvolvido no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, que simula a circulação hidrodinâmica, fenômenos de dispersão (abordagem euleriano e lagrangeana), parâmetros de qualidade de água e transporte de sedimentos coesivos e não coesivos (CAMPUZANO et al., 2009). Santos (2011) utilizou o MOHID para estudar a distribuição de sedimentos na região dos estuários dos rios Caravelas e Peruípe, no estado da Bahia. O modelo mostrou que os canais que conectam os dois estuários possuem grande influência na dinâmica sedimentar do sistema estuarino, e são

modulados pela altura da maré, com pouca contribuição do aporte de água doce. Indicou também que a maior quantidade de sedimentos permaneceu no interior do rio e nos canais.

MIKE 21 HD FM é um modelo desenvolvido pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute*); o modelo hidrodinâmico trabalha em módulo 2DH ou 1D na vertical e simula o transporte de sedimentos em estuários, baías e áreas costeiras. O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (2014) utilizou o modelo Mike 21 HD FM com o intuito de estimar a taxa de assoreamento no canal de acesso ao Porto de Paranaguá. O trabalho mostrou a acumulação do material fino estimado em 900000 m<sup>3</sup>/ano e 2740000 m<sup>3</sup> /ano de areia no canal de acesso aos portos.

SEDI (*Sédimentation en cana d'irrigation*) é um modelo desenvolvido no Instituto de Pesquisa vinculado ao Ministério da Agricultura da França que trabalha como módulo acoplado ao modelo SIC (*Simulation of Irrigation Canal*). Guennec & Strasser (2007) estudaram o transporte de sedimentos em suspensão no rio Amazonas para verificar o comportamento dos sedimentos finos em suspensão. Os resultados obtidos mostraram que a condição hidráulica do rio foi suficiente para manter os sedimentos finos em suspensão ao longo de todo o domínio da modelagem.

## **2.5 SISBAHIA<sup>®</sup> - Sistema base de hidrodinâmica ambiental<sup>1</sup>**

O presente trabalho utiliza o SisBAHIA<sup>®</sup> - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). O SisBAHIA<sup>®</sup> é um sistema de modelos que começou a ser desenvolvido em 1987, com novas versões continuamente atualizadas.

O SisBAHIA<sup>®</sup> é capaz de realizar modelagem ambiental de corpos de água e é constituído por um conjunto de modelos entre os quais destaca-se o de circulação hidrodinâmica para corpos de água rasos, o de transporte

---

<sup>1</sup> Esta seção adapta e reproduz textos contidos na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, que pode ser baixada de [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

euleriano, o de qualidade de água e eutrofização, o de transporte lagrangeano e um modelo de geração e propagação de ondas.

A discretização espacial horizontal do SisBAHIA<sup>®</sup> é feita usando o método de elementos finitos, preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode ser feita utilizando elementos finitos triangulares quadráticos ou até mesmo uma combinação de ambos. Esse método permite que os elementos tenham tamanhos adaptados aos contornos do domínio, resultando em uma melhor representação de locais com irregularidades das fronteiras de terra.

O modelo de circulação hidrodinâmico do SisBAHIA<sup>®</sup> é chamado de FIST3D (filtered in space and time 3D). Trata-se de um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamentos homogêneos e de grande escala. O modelo é composto por dois módulos: um módulo bidimensional na horizontal (2DH) que calcula correntes promediadas na vertical e a elevação da superfície livre; e outro módulo em 3D, que calcula o campo de velocidades tridimensional para obter os perfis de velocidade no campo de escoamento horizontal.

Corpos d'água como estuários, baías e áreas costeiras podem ser adequadamente modelados usando modelos bidimensionais na horizontal. Em geral esses corpos d'água apresentam escalas horizontais de escoamentos muito maiores que as escalas verticais, e a coluna d'água é considerada como bem misturada, ou seja, com pouca ou nenhuma estratificação. Portanto, a circulação pode ser representada por meio de variáveis médias na vertical (XAVIER, 1996). O Complexo Estuarino de Paranaguá, área de interesse deste trabalho, pode ser enquadrada nesta classificação; como um corpo de água raso e padrões de estratificações fracos. Assim justifica-se a utilização do modelo acima mencionado no estudo da circulação de suas águas (CUNHA, et al., 2015).

A mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento é governada pela equação de Navier-Stokes. Tais equações representam o princípio da conservação da quantidade de movimento, e em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte, para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo d'água.

As equações necessárias para determinar as três incógnitas de circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH integrado na vertical ( $\zeta$ ,  $U$ ,  $V$ ), são resumidas a seguir.

Equação de quantidade de movimento bidimensional na direção  $x$ :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s - \tau_x^b) + 2\Phi \sin\theta V \quad (1)$$

Equação de quantidade de movimento bidimensional na direção  $y$ :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^s - \tau_y^b) + 2\Phi \sin\theta U \quad (2)$$

Equação de continuidade bidimensional:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Onde:  $U$  é a velocidade promediada na vertical na direção  $x$ ;  $V$  é a velocidade promediada na vertical na direção  $y$ ;  $g$  é a gravidade;  $\zeta$  é a elevação da superfície livre;  $\rho_0$  é a massa específica de referência;  $H$  é a profundidade instantânea;  $\tau_{xx}$  é a tensão de atrito horizontal;  $\tau_{xy}$  é a tensão de atrito na vertical;  $\tau_x^s$  é tensão de atrito na superfície livre;  $\tau_x^b$  é a tensão de atrito no fundo;  $\Phi$  é a velocidade angular da rotação da Terra no sistema de coordenadas local;  $\theta$  é o ângulo de latitude.

Para o modelo de circulação hidrodinâmica do SisBAHIA<sup>®</sup> há dois tipos básicos de fronteira: abertas e fechadas. As fronteiras fechadas, também chamadas de terra, definem as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes ou efluentes, e ao longo dos quais é necessário prescrever vazões ou velocidades normais e tangenciais ao contorno. Nas fronteiras abertas, prescrevem-se elevações da superfície livre.

Em relação à equação de transporte advectivo-difusivo, a análise numérica pode ser feita por modelos eulerianos, lagrangeanos e euleriano-lagrangeano. Garção (2010) cita que os modelos lagrangeanos são preferíveis à utilização para a simulação de escalas de pluma ou manchas de contaminantes, em virtude do tratamento do termo advectivo da equação de

transporte. Os modelos eulerianos são mais adequados na simulação do transporte de escalares que se encontram dissolvidos na coluna d'água. Dessa forma, o modelo euleriano foi escolhido para simular o transporte de sedimentos dissolvidos na coluna d'água.

O modelo de transporte euleriano advectivo-difusivo do SisBAHIA<sup>®</sup> pode ser usado para simular a distribuição de sedimentos coesivos, ou seja, substâncias e escalares passivos dissolvidas na coluna d'água. O SisBAHIA<sup>®</sup> permite o estudo da evolução sedimentológica. Neste caso, o modelo de circulação hidrodinâmica deve ser acoplado ao modelo sedimentológico, ou seja, o modelo hidrodinâmico desenvolvido “roda” junto com o modelo sedimentológico acoplado para transporte de sedimentos e processos de erosão e assoreamento.

A perda de massa por sedimentação é calculada no SisBAHIA<sup>®</sup> a partir da velocidade de sedimentação, variável no tempo e espaço, e da altura da coluna d'água, como mostra na equação (4):

$$K_s(x, y, t) = -\ln(0,205) \frac{V_s}{H}(x, y, t) \quad (4)$$

Onde:  $K_s$  é a taxa de sedimentação,  $V_s$  é a velocidade de sedimentação,  $H$  é a altura da coluna d'água. O valor 0,205 é ajustado para que a diferença acumulada tenda a zero após o tempo de sedimentação característico ( $T = H/V_s$ ). Isto é, no início ocorre deposição mais rápida que a teoria linear para granulometria uniforme, no fim a deposição é mais lenta. Sendo assim,  $K_s$  é variável porque em locais com profundidade maiores ( $H$ ), o tempo da deposição deve ser maior que em locais mais rasos.

Se em um dado local há pouca turbulência, as partículas sedimentam ( $K_s$  positivo), quando há muita turbulência ( $K_s$  negativo) pode ocorrer ressuspensão. A taxa de ressuspensão é dada pela taxa de sedimentação ( $K_s$ ) multiplicada por um fator de ressuspensão, que pode ter valores entre [0 e 1].

O modelo de circulação hidrodinâmica com fundo móvel faz o balanço de massa dos sedimentos no fundo, calculando o transporte de sedimentos ao longo do tempo devido à ação dos processos hidrodinâmicos. Ao longo do tempo, a altura da superfície do fundo vai sendo alterada, podendo avaliar a evolução morfológica no domínio de modelagem e quantificar taxas de erosão e assoreamento. Com a mudança da batimetria alteram-se também a



circulação e as ações dos agentes hidrodinâmicos, ocasionando em um processo com retroalimentação.

Para verificar o movimento dos sedimentos de fundo, um critério de mobilidade deve ser aplicado para determinar se há condições de movimento dos grãos ou se permanecerão em repouso. Para uma determinada granulometria de sedimentos no leito, o processo de erosão e transporte, bem como de assoreamento, depende da tensão crítica de mobilidade. O SisBaHIA<sup>®</sup> define o critério de mobilidade baseado no parâmetro de *Shields*,  $\psi$ , como:

$$\psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\gamma_a(S_s - 1)d} = f\left(\frac{du_*}{\nu}\right) ; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} = \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (5)$$

Onde  $\tau_o$  é tensão de fundo;  $\gamma_s$  é peso específico do grão;  $\gamma_a$  é o peso específico da água;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $\rho_s$  é a massa específica do sedimento;  $\rho_a$  é a massa específica da água;  $d$  é o diâmetro do grão;  $u^*$  é a velocidade de atrito no leito;  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água; o termo  $\left(\frac{du_*}{\nu}\right)$  é o número de Reynolds do grão;  $S_s$  é a densidade do sedimento em relação à água.

No SisBAHIA<sup>®</sup>, a velocidade de atrito ( $u^*$ ) é definida como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_0}} \quad (6)$$

Onde  $\tau_o$  é a tensão de atrito no fundo, calculada como:

$$\tau_o = \rho_0 \beta U_i \quad (7)$$

Onde  $U_i$  é a componente da velocidade na direção  $x_i$  e o parâmetro  $\beta$  pode ser determinado a partir do coeficiente de Chézy,  $C_h$ :

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (8)$$

Finalmente o coeficiente de Chézy é definido a partir de  $\varepsilon$ , que é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo, e da profundidade local,  $H$ , como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{2\varepsilon} \right) \quad (9)$$

Para a aplicação do critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields, é preciso realizar a comparação entre a tensão de fundo ( $\tau_o$ ), causada pelas correntes em um dado local, e a tensão crítica ( $\tau_c$ ) para mobilidade dos sedimentos no mesmo local. Teoricamente, se a tensão de

fundo é superior à tensão crítica de mobilidade, deve ocorrer o transporte dos grãos, para os valores da tensão de fundo inferior, os sedimentos ficam imóveis, ou, se estiverem em movimento, tendem a se depositar.

A Tabela 1 apresenta valores da tensão crítica de mobilidade dos sedimentos conforme o tipo de areia e sua granulometria e a média da tensão crítica de mobilidade utilizada no SisBAHIA®.

Tabela 1 – Exemplos de valores de tensão crítica de mobilidade, do parâmetro de Shields em função do diâmetro e do diâmetro em unidades  $\phi$ , para diferentes tipos de areia com massa específica  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_o = 998,1 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade cinemática  $\nu = 1.05E^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Sedimentos	d (mm)	d ( $\phi$ )	$S^*$	$\Psi$	$\tau_{oc} \text{ (N/m}^2\text{)}$
Areia Muito Fina	0.062	4.01	0.47	0.151	0.152
	0.083	3.59	0.72	0.115	0.154
	0.104	3.27	1.01	0.093	0.156
	0.125	3.00	1.33	0.078	0.158
Areia Fina	0.146	2.78	1.68	0.068	0.159
	0.166	2.59	2.06	0.060	0.163
	0.187	2.42	2.46	0.057	0.172
	0.208	2.26	2.88	0.053	0.180
	0.229	2.13	3.32	0.050	0.186
Areia Média	0.250	2.00	3.79	0.047	0.190
	0.275	1.86	4.37	0.044	0.195
	0.300	1.74	4.98	0.041	0.199
	0.325	1.62	5.62	0.039	0.204
	0.350	1.51	6.28	0.037	0.209
	0.375	1.42	6.96	0.035	0.215
	0.400	1.32	7.67	0.034	0.222
	0.425	1.23	8.40	0.033	0.231
	0.450	1.15	9.15	0.033	0.240
	0.475	1.07	9.92	0.032	0.249
Areia grossa	0.500	1.00	10.72	0.032	0.258
	0.600	0.74	14.09	0.031	0.299
	0.700	0.51	17.76	0.030	0.345
	0.800	0.32	21.69	0.033	0.428
Areia Muito Grossa	0.900	0.15	25.88	0.034	0.491
	1.000	0.00	30.32	0.034	0.558
	2.000	-1.00	85.75	0.042	1.367

Sedimentos	$\tau_{oc} \text{ (N/m}^2\text{)}$
Areia Muito Fina	0.155
Areia Fina	0.172
Areia Média	0.219
Areia Grossa	0.391
Areia Muito Grossa	0.962

Fonte: Adaptado do SisBAHIA (2015).

Várias formulações para calcular o transporte de sedimentos estão disponíveis na literatura. No SisBAHIA® é dada a opção da escolha da fórmula para cálculo do transporte de sedimentos, dentre as disponíveis no sistema.

Como o resultado obtido por diferentes formulações pode variar significativamente, a escolha da fórmula pode ter grande importância no resultado da modelagem. A Tabela 2 apresenta as formulações disponíveis no SisBAHIA<sup>®</sup>, a faixa de granulometria recomendável e o tipo de transporte, só arraste ou total.

Tabela 2 - Fórmulas de transporte de sedimentos, com faixa de granulometria recomendável e o tipo de transporte.

Fórmula:	Faixa granulométrica	Arraste	Total
Meyer-Peter e Muller (1948)	0.40 a 30.0mm	X	-
Yalin (1963/1977)	0.30 a 30.0mm	X	X
Van Rijn (1984)	0.20 a 2.00mm	X	-
Madsen (1991)	0.08 a 6.00mm	X	-
Nielsen (1992)	0.60 a 30.0mm	X	-
Ackers & White (1973-1990)	0.04 a 4.00mm	X	X
Engelund e Hansen (1967)	0.08 a 45.0mm	X	X
Van Rijn (2007)	0.05 a 2.00mm	X	X

Fonte: Adaptado Rosman (2015)

Nas formulações de transporte de sedimentos do SisBAHIA<sup>®</sup> podem ser incluídas o efeito das ondas, acoplando o modelo de circulação hidrodinâmica a um modelo de geração de ondas vento ou de propagação. Neste trabalho são apresentadas as formulações sem o efeito de ondas; Rosa (2009) mediu o regime de ondas atuantes em 13 locais do CEP e mostrou que, durante a preamar, o CEP está sob ação de ondas de pequena amplitude e, em maré baixa, somente as praias localizadas próximas à desembocadura do CEP sofrem com uma pequena ação das ondas, constatando assim que, o Complexo Estuarino de Paranaguá não é influenciado de forma significativa pela ação das ondas que se formam na região costeira adjacente.

Para o cálculo da vazão sólida,  $q_s$  (m<sup>3</sup>/s/m), o SisBAHIA<sup>®</sup> utiliza os seguintes parâmetros:

$\tau_o$  = Tensão de fundo exercida pelas correntes;

$\tau_{cr}$  = Tensão crítica de mobilidade do grão;

$\rho_a$  = Massa específica da água;

$\rho_s$  = Massa específica do sedimento do leito;

$\gamma_a$  = Peso específico da água;

$\gamma_s$  = Peso específico do sedimento;

$d_{50}$  = Diâmetro 50% na curva granulométrica.

O uso de grandezas adimensionais facilita a visualização e comparação dos resultados. As expressões abaixo são utilizadas para adimensionalizar a vazão sólida e a tensão de fundo, respectivamente:

$$q_s^* = \frac{q_s}{d\sqrt{g(S_s - 1)d}} \quad (10)$$

$$\tau_o^* = \psi = \frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho_a)d} ; \text{idem para } \tau_c^* \quad (11)$$

Onde  $d$  é o diâmetro característico dos sedimentos, usualmente utilizado o diâmetro mediano  $d_{50}$ ,  $S_s = \frac{\rho_s}{\rho_a}$  é a densidade do sedimento em relação à água do ambiente e a tensão de fundo ( $\tau_o$ ) é soma vetorial das componentes  $x$  e  $y$ .

As formulações disponíveis no SisBAHIA<sup>®</sup> são:

- Meyer-Peter e Muller (1948): A fórmula de Meyer Peter & Muller para transporte de fundo incluindo a ação de correntes é dada por:

$$q_s^* = 8(\tau_o^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (12)$$

- Yalin (1963/1977): A fórmula de Yalin pode ser adotada para o transporte de fundo ou total, incluindo somente a ação das correntes é dada por:

$$q_s^* = 0,635\sqrt{\tau_o^*} \left[ \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} - \frac{\ln\left(1 + a \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c}\right)}{a} \right] ; \text{onde } a = 2,45 \sqrt{\frac{\tau_c^*}{S_s^{0,4}}} \quad (13)$$

- Van Rijn (1984): A formulação de Van Rijn tem sido muito aplicada em corpos d'água costeiros, como estuários. A fórmula adotada, para transporte de fundo, incluindo somente a ação das correntes é dada por:

$$q_s^* = \frac{0,053}{d_*^{0,3}} \left( \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} \right)^{2,1} ; \text{onde } d_* = d_{50} \left( \frac{g(S_s - 1)}{v^2} \right)^{1/3} \quad (14)$$

- Madsen (1991): A fórmula de Madsen para transporte de fundo é dada por:

$$q_s^* = 10(\sqrt{\tau_o^*} - 0,7\sqrt{\tau_c^*})(\tau_o^* - \tau_c^*) \quad (15)$$

• Nielsen (1992): A fórmula de Nielsen adotada para transporte de fundo é dada por:

$$q_s^* = 12\sqrt{\tau_o^*}(\tau_o^* - \tau_c^*) \quad (16)$$

• Ackers & White (1973-1990): A fórmula de Ackers & White adotada para o transporte de fundo ou total é dada por:

$$q_s^* = \frac{S_s U}{\sqrt{g(S_s - 1)d_{50}}} \left(\frac{U}{u_*}\right)^n C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^m \quad (17)$$

Onde  $H$  é a coluna d'água e  $U$  é a componente média da velocidade e o fator de mobilidade do grão ( $F_{gr}$ ) é dada por:

$$F_{gr} = \max \left[ \frac{u_*^n / \sqrt{gd_{50}(S_s - 1)}}{\left[\sqrt{32} \log(10H/d_{50})\right]} \left(\frac{U}{\left[\sqrt{32} \log(10H/d_{50})\right]}\right)^{1-n} ; A \right] \quad (18)$$

Os parâmetros  $A$ ,  $C$ ,  $m$  e  $n$  são dadas por:

$$D_* = \min(d_*; 60) \left\{ \begin{array}{l} A = \max(0,17; 0,23D_*^{-0,5} + 0,14) \\ C = 10^{(-3,46+2,79\log D_* - 0,98(\log D_*)^2)} \\ m = \max(1,78; \frac{6,83}{D_*} + 1,67) \\ n = \max(0,0; \min(1,0; 1 - 0,56\log D_*)) \end{array} \right.$$

• Engelund e Hansen (1967): A fórmula de Engelund & Hansen para o transporte de fundo ou total é dada por:

$$q_s^* = \begin{cases} \frac{0,05}{c_f} (\tau_o^*)^{5/2} & \text{se } \tau_o^* > \tau_c^* \\ 0 & \text{se } \tau_o^* < \tau_c^* \end{cases} \quad (19)$$

onde  $c_f$  é o coeficiente de atrito no fundo definido no modelo de circulação hidrodinâmico.

• Van Rijn (2007): A fórmula de Van Rijn para transporte total no SisBaHiA<sup>®</sup> resulta da soma do transporte de fundo de arraste com o transporte em suspensão que inclui somente a ação de correntes, dada por:

$$q_s^* = \frac{0,015}{c_f^{1,25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0,2} \sqrt{\tau^*} (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{1,5} + \frac{0,012}{c_f^{1,7}} D_*^{-0,6} \sqrt{\tau^*} (\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*})^{2,4} \quad (20)$$

Os resultados são compostos por uma tabela contendo a vazão sólida, a direção da vazão sólida e a alteração da cota negativa do fundo acumulada

em cada nó do domínio. Lembrando que os valores negativos apresentam a deposição, e os valores positivos, a erosão de sedimentos. A batimetria atualizada pode ser obtida pela batimetria inicial do modelo com a soma da alteração da batimetria do fundo, acumulada ao longo do intervalo de tempo.

O uso de modelos numéricos tem sido cada vez mais utilizado na gestão de recursos hídricos. Neste contexto, o SisBAHIA<sup>®</sup> vem sendo adotado para a modelagem de corpos d'água continentais e costeiros, destacando-se alguns estudos.

Cunha et al. (2015) aplicaram o SisBAHIA<sup>®</sup> no Complexo Estuarino de Paranaguá com o objetivo de estudar o transporte de sedimentos e suas implicações, determinar a zona de máxima turbidez e o transporte do material particulado em suspensão oriundos dos rios. Foi utilizado o modelo de transporte Lagrangeano acoplado ao modelo de circulação hidrodinâmico para um período de 384 dias, considerando 24 ciclos de 16 dias e, para cada ciclo, foi determinado o padrão de circulação. O estudo apresentou que o transporte de sedimentos é bastante relacionado com a capacidade das correntes em transportar os sedimentos em suspensão e pela circulação residual, mostrando ainda que o CEP apresenta uma tendência de vazante, porém, sem capacidade de expulsar os sedimentos oriundos dos rios para fora do Complexo.

Rosenhagen (2013) aplicou o sistema computacional do SisBAHIA<sup>®</sup> comparando seus resultados com modelos matemáticos. Utilizou uma fórmula de transporte de sedimentos considerando ondas e correntes. Este modelo foi validado com dados de transporte de sedimentos medidos em campo, disponíveis na literatura, concluindo que a inclusão de ondas no transporte de sedimentos, através da ressuspensão no fundo, exerce grande impacto nas taxas de transporte. Os resultados indicaram que o transporte pode aumentar ordens de grandeza sob o efeito de grandes ondas, mostrando que a intensificação do transporte é maior quanto mais intensa forem às ondas que caracterizam o sistema.

Spiegelberg (2010) acopla o modelo morfodinâmico do DELFT3D com o modelo de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA<sup>®</sup> com o objetivo de estimar o transporte sólido e seus efeitos sobre o leito, e aplica no reservatório da Usina Hidrelétrica Estreito. O modelo se mostrou útil à determinação do

transporte sólido em corpos d'água, assim como na avaliação da degradação do leito.

Roversi (2012) apresenta a circulação hidrodinâmica do Sistema Estuarino de Santos e aspectos relacionados ao transporte de constituintes presentes em suas águas. Aplicou o modelo de transporte lagrangeano e euleriano com intuito de analisar os tempos de residência e as taxas de renovação das águas do sistema. Verifica-se que, ao longo do Estuário do Canal do Porto de Santos, os tempos de residência podem variar de 40 a 70 dias, entre a embocadura do canal principal e o final do Canal de Piaçaguera; a renovação das águas da Baía de Santos pelo aporte fluvial não ultrapassa 2%, após 15 dias, pelo efeito da maré, a renovação da água da baía ultrapassa os 10%, e após um mês, a renovação ultrapassa 95%.

Sigaúque (2013) avalia os aspectos da circulação hidrodinâmica e processos sedimentológicos em curso na Lagoa de Araruama, com foco no Canal de Itajurú. Os resultados obtidos indicaram que a lagoa de Araruama é constituída por dois compartimentos hidrodinâmicos, um dominado pela ação da maré e outra pela ação dos ventos. O aumento de velocidades refletiu grande mobilidade de sedimentos, alterando o fundo e modificando a batimetria. As regiões de correntes menores apresentaram pouca dinâmica sedimentar.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de verificar como os sedimentos oriundos dos rios afluentes ao CEP e a movimentação de fundo influenciam a evolução morfológica no Complexo Estuarino de Paranaguá, o presente trabalho usou o modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional e o modelo de transporte euleriano do SisBAHIA<sup>®</sup>. Sendo assim, optou-se por dividir o trabalho em 3 etapas (Figura 1).

A primeira etapa consiste em aplicar o modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional para todo o ano de 2009. A segunda etapa, em calibrar e validar o modelo hidrodinâmico comparando os resultados obtidos com os observados em campo. Por fim, a terceira etapa é a aplicação do modelo de transporte euleriano do SisBAHIA<sup>®</sup>.

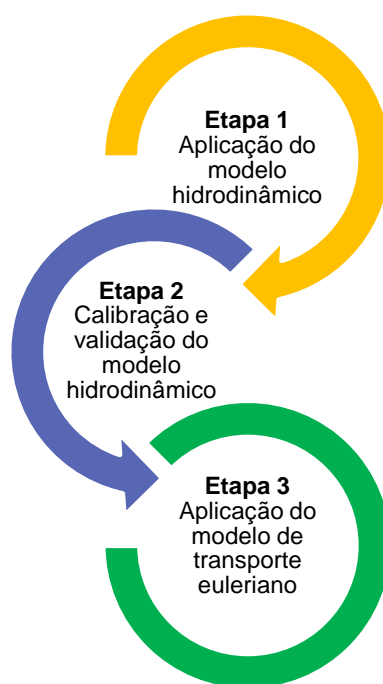


Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho.



### 3.1 Área de estudo

#### 3.1.1 Características gerais

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), apresentado na Figura 2, está situado no estado do Paraná, na costa sul do Brasil. Possui como limite, ao norte e ao oeste, a Serra do Mar, a leste, o Oceano Atlântico e ao sul, a planície costeira paranaense. É composto por dois eixos principais, o eixo Leste-Oeste e o eixo Norte-Sul, totalizando uma área de aproximadamente 612 km<sup>2</sup> (LANA, et al., 2001). O CEP é composto por dois principais corpos d'água, as baías de Antonina e Paranaguá (eixo Leste-Oeste) e ainda, as baías de Pinheiros, Guaraqueçaba e Laranjeiras (eixo Norte-Sul). As conexões das baías com o oceano acontecem através dos canais da Galheta, Norte e Superagui (ANGULO, 2009).

A região possui uma grande diversidade de ambientes como mangues, baixios, costões rochosos e planícies de marés, que recebem influências da circulação hidrodinâmica, fortemente influenciados pelas descargas fluviais e pelas variações provocadas pelas marés (MANTOVANELLI, 1999). Segundo Angulo (1992), o CEP é caracterizado como um estuário de planície costeira com presença de deltas de maré em sua desembocadura.

O eixo Norte-Sul apresenta menor relação comprimento/largura e menor profundidade, com um uso e ocupação dos solos diferenciados e maior área de mangue, com aproximadamente 133 km<sup>2</sup> (NOERNBERG, 2001). O eixo Leste-Oeste apresenta maior relação comprimento/largura, maior influência das bacias de contribuição, com resposta mais rápida e intensa aos processos relacionados ao aporte de água doce, como a entrada de sedimentos fluviais, intrusão salina e processos de mistura. Neste eixo estão localizadas as baías de Antonina e Paranaguá (NOERNBERG et al., 2006).

Na baía de Paranaguá localizam-se o porto Barão de Tefé (desativado), os Terminais Portuários da Ponta do Félix S.A., no município de Antonina, e o Porto de Paranaguá, no município de Paranaguá. A existência destes terminais portuários ao longo do eixo Leste-Oeste do CEP exige manutenção constante do canal de acesso, realizada por meio de dragagens (FALKENBERG, 2009).

Nesse sentido, ressalta-se a importância do presente trabalho em identificar os locais de deposição dos sedimentos no canal de acesso aos portos do CEP. Isto porque, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível indicar regiões com tendência à deposição ou a erosão, permitindo assim o melhor planejamento das ações de dragagem.

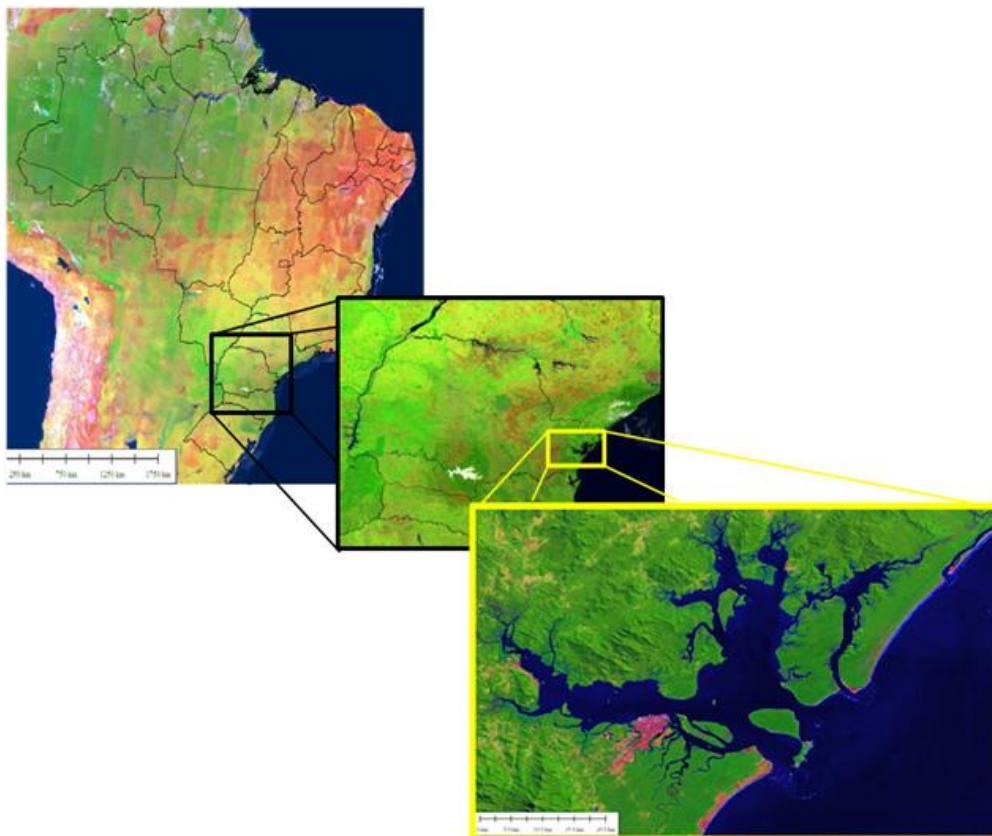


Figura 2 – Localização da área de estudo – Complexo Estuarino de Paranaguá.  
Fonte: *Coastal Planning & Engineering do Brasil* (2010).

### 3.1.2 Características climáticas

O clima da região do CEP é classificado como subtropical úmido, com período de chuvas durante todo o ano (RIBAS, 2004). Os ventos são predominantes da direção ENE, E, ESSE e SE, com intensidade média de 4,0 m/s (CAMARGO, 1998). As montanhas da Serra do Mar atuam como barreira aos sistemas de circulação atmosférica e às penetrações das massas de ar úmidas provindas do Atlântico Sul resultando na concentração de frentes estacionárias na região das baías (NIMER, 1971).

A precipitação média anual do CEP é de 2500 mm, com taxas pluviométricas três vezes maiores no período de maior chuva, apresentando uma umidade relativa de aproximadamente 85% (LANA et al., 2001).

### 3.1.3 Características hidrográficas

A região do estudo recebe a drenagem de aproximadamente 70% da bacia hidrográfica do litoral Paranaense. A Baía de Paranaguá e Antonina sofrem uma maior influência da água continental, sendo drenado para essa região o aporte de água doce de uma bacia de contribuição de aproximadamente 2188 km<sup>2</sup> (MANTOVANELLI, 1999).

Os vários rios que deságuam no CEP nascem nas encostas da Serra do Mar com altitudes entre 100 e 1900 metros, sendo os principais o rio Cachoeira e o rio Nhundiaquara. A alta instabilidade em regiões de serras, decorrente de grande declividade confere a estes rios um alto potencial erosivo. A bacia hidrográfica do CEP sofre com períodos de inverno com a defasagem hídrica e excedente hídrico no verão; este aumento da precipitação eleva mais o potencial de erosividade destes rios (NOERNBERG, 2001).

### 3.1.4 Dinâmica hídrica

A circulação hidrodinâmica do CEP é regida principalmente pelas corrente de maré e pelo aporte da vazão fluvial. Ao efeito dessas forças motrizes, soma-se a ação dos ventos, os gradientes de salinidade, formados a partir da mistura entre a água doce proveniente dos rios e a água salgada do oceano, e as características geomorfológicas do estuário (MANTOVANELLI, 1999).

Ademais, o Complexo Estuarino de Paranaguá é classificado como micro maré, e seu regime é caracterizado por um padrão semi-diurno com desigualdade diurna na presença de amplitudes de marés máximas (KNOPPERS et al., 1987). O atraso na ocorrência de maré aumenta progressivamente, conforme se avança estuário adentro. As marés em

Antonina ocorrem em torno de 1,5 a 2 horas de atraso em relação ao canal da Galheta (CUNHA et al., 2015; MARONE & JAMIYANAA, 1997).

Além disso, o CEP apresenta baixa ação das ondas, pois os bancos de areia e deltas formados nas entradas do CEP agem como quebra-mares submersos, dissipando a energia das ondas. Dessa forma, no interior do estuário podem ser encontradas ondas de pequenas alturas, inferiores a 0,5 metros (SOUZA, 2015).

É importante salientar que, para utilização do modelo bidimensional, é preciso que o local apresente pouca estratificação vertical (térmica e salina). Segundo Mantovanelli (1999), o CEP é classificado como parcialmente misturado e apresenta baixa variação térmica na coluna d'água. Medições de perfis de temperatura foram realizadas no canal da Coatinga (Figura 3), próximo ao porto de Paranaguá em março de 2009, em períodos de quadratura e sizígia (Figura 4). Pode-se observar que os valores de temperatura não apresentam variações ao longo da coluna d'água (Figura 5), indicando que, nesta região, não ocorre estratificação térmica.

Segundo Marone et al. (1995) e Lana et al. (2001), o CEP apresenta baixo índice de estratificação salina; em períodos muito chuvosos, exibe um certo padrão de estratificação salina. A salinidade do CEP apresenta valores médios entre 12 a 29 psu no período chuvoso (verão) e, entre 20 a 34 psu no período seco (inverno).

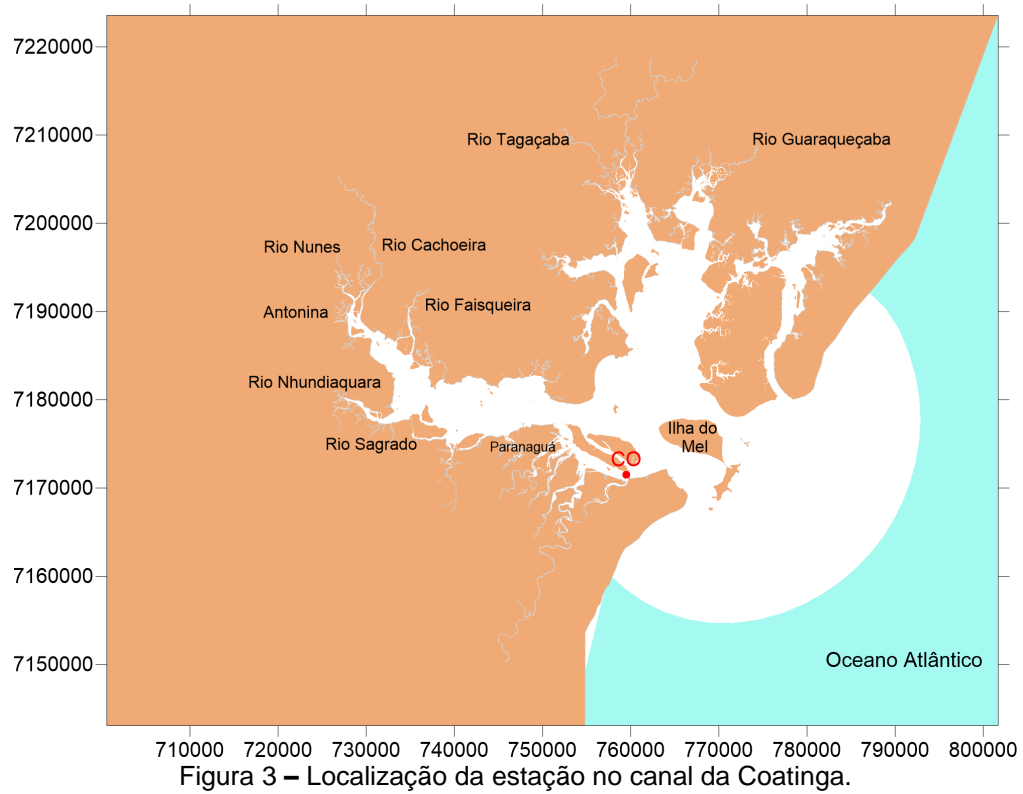


Figura 3 – Localização da estação no canal da Coatinga.

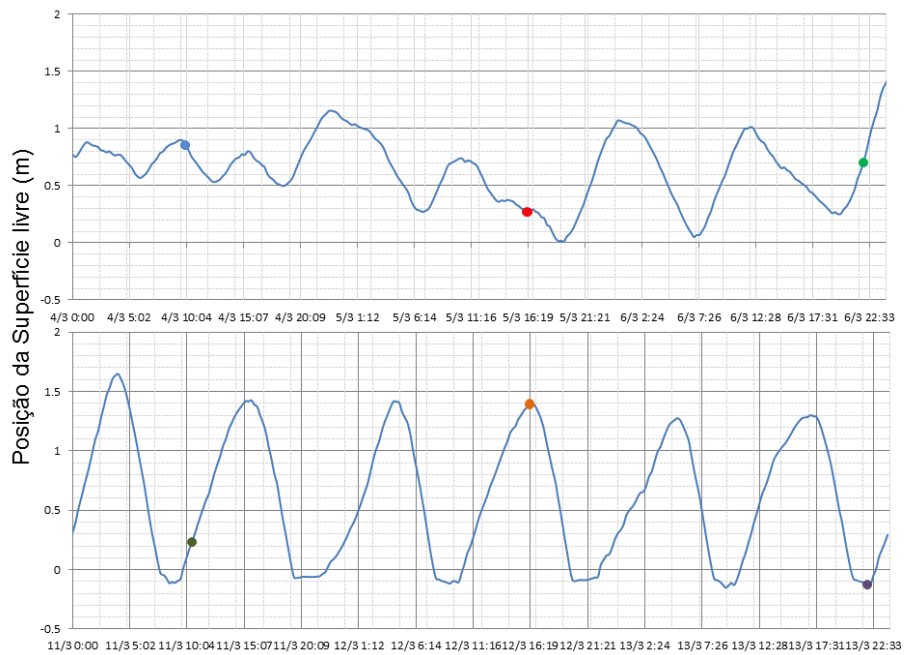


Figura 4 – Posição da superfície livre no canal da Coatinga, com a indicação dos instantes quando foram realizadas medições dos perfis de temperatura.

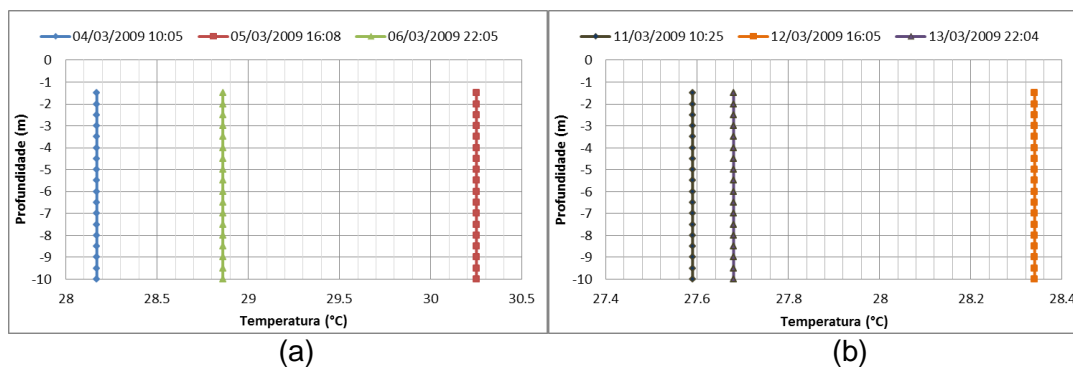


Figura 5 – Perfis de temperatura nos período de quadratura (a) e sizígia (b) na região do canal da Coatinga.

### 3.2 Batimetria

Os dados batimétricos foram obtidos a partir da digitalização das cartas Náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) de nº 1820, 1821 e 1822 e dados obtidos pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria Ambiental.

Portanto, o conjunto de dados gerados com a digitalização das cartas constituiu a base dos dados, e com os dados recebidos pela EnvEx aplicou-se o melhoramento dos dados digitalizados. A batimetria gerada como produto final e utilizada pelo modelo é apresentada na Figura 6. Boa parte dos dados batimétricos do CEP são da década de 70, sendo esses referentes às regiões C, D e E, indicadas na Figura 7. O levantamento batimétrico da região do canal de acesso ao Porto de Paranaguá, indicado pela região A, foi realizado no ano de 2015; e no canal da Coatinga, indicado pela região B, no ano de 1992. As cartas náuticas utilizadas para a construção da batimetria estão demonstradas nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

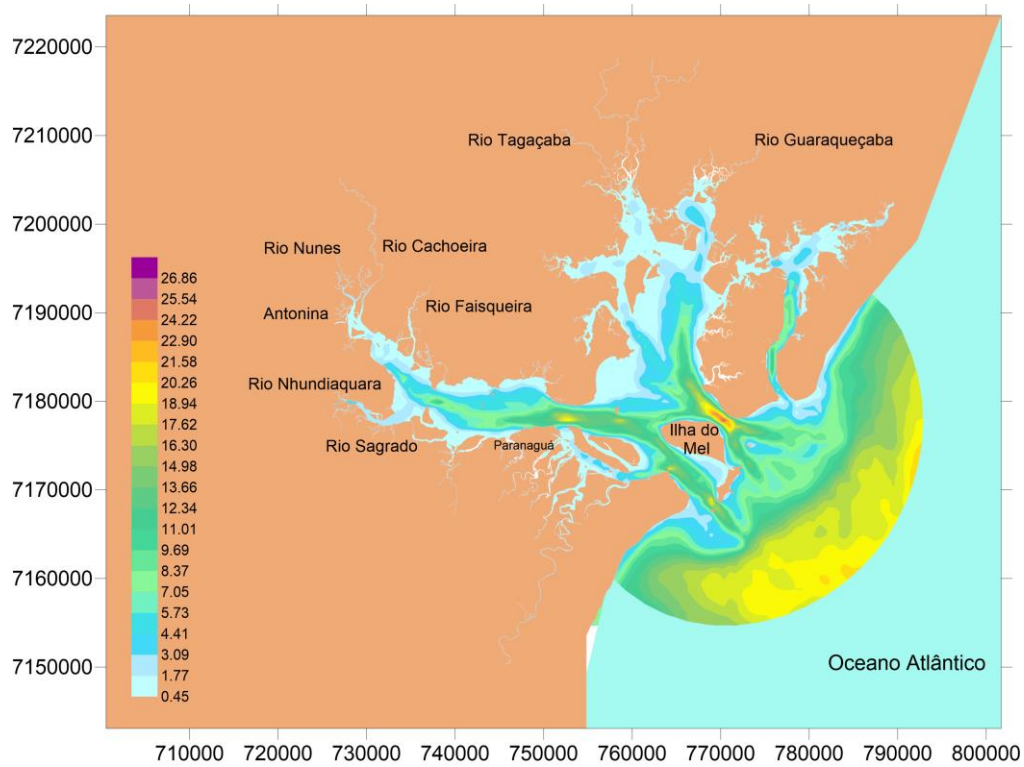


Figura 6 – Batimetria do Complexo Estuarino de Paranaguá usada neste trabalho.

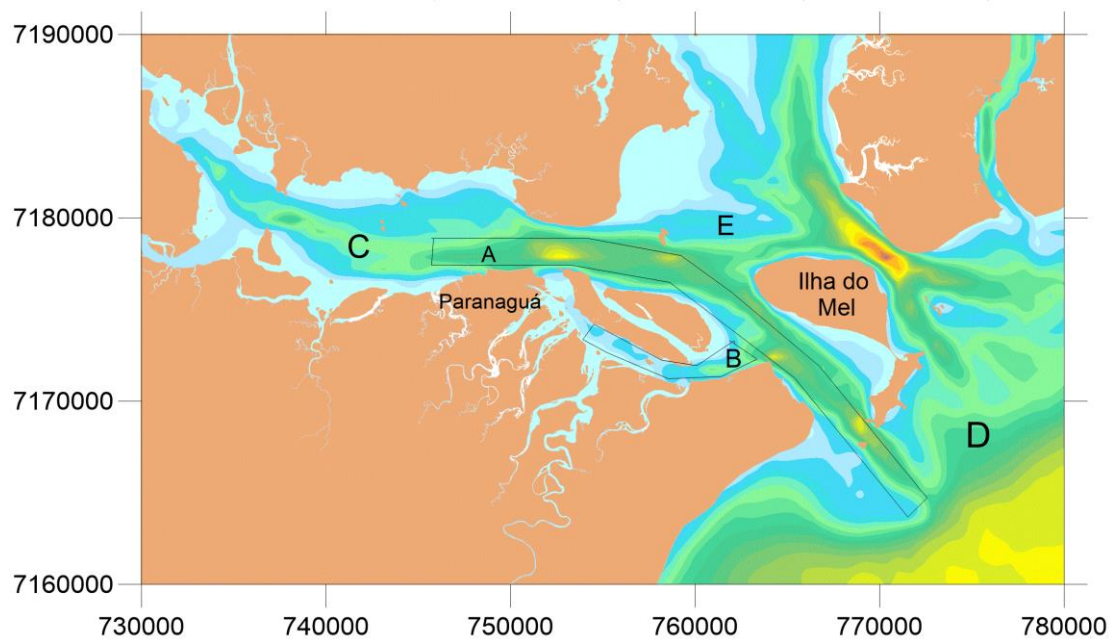


Figura 7 – Regiões com diferentes levantamentos batimétricos, com destaque para o canal de acesso ao porto de Paranaguá.



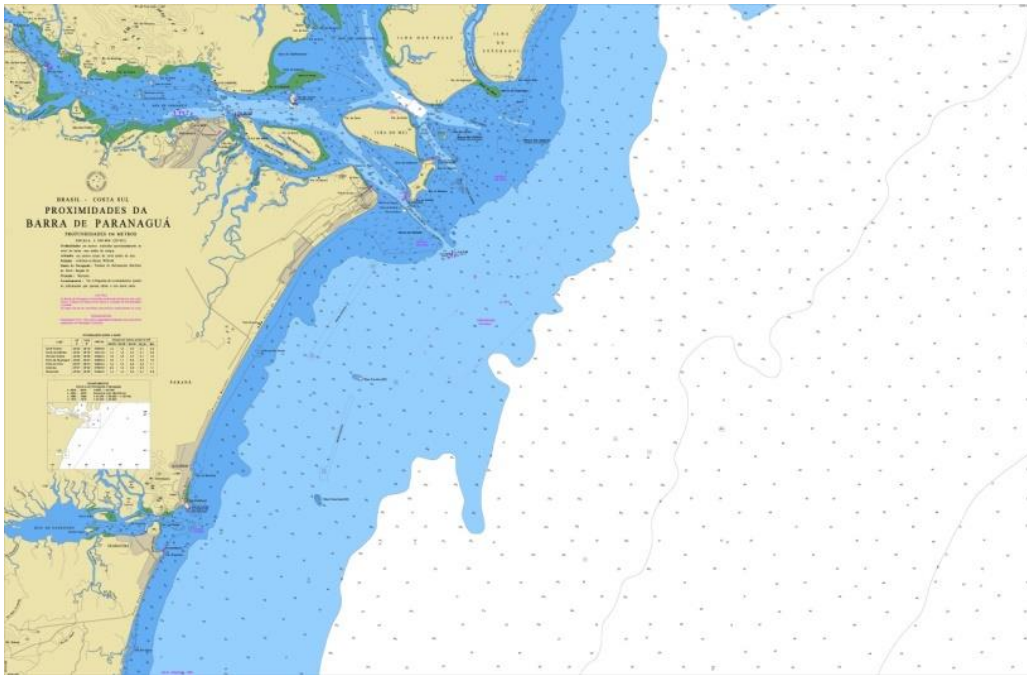


Figura 8 – Carta Náutica de nº 1820.  
Fonte: DHN -Diretoria de Hidrografia e Navegação (2015).



Figura 9 – Carta Náutica de nº 1821.  
Fonte: DHN -Diretoria de Hidrografia e Navegação (2015).



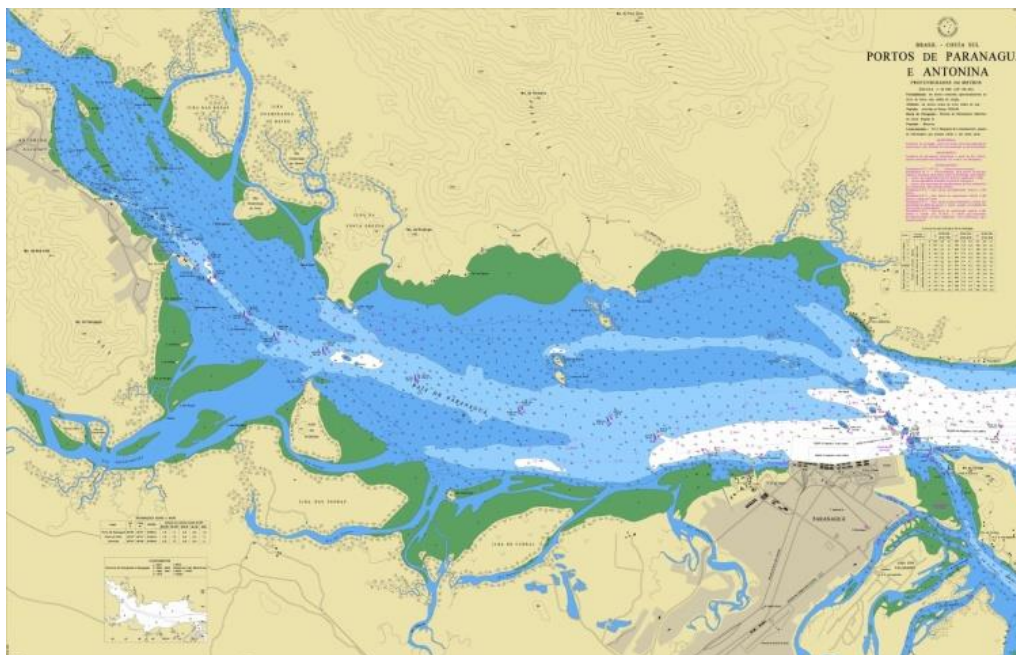


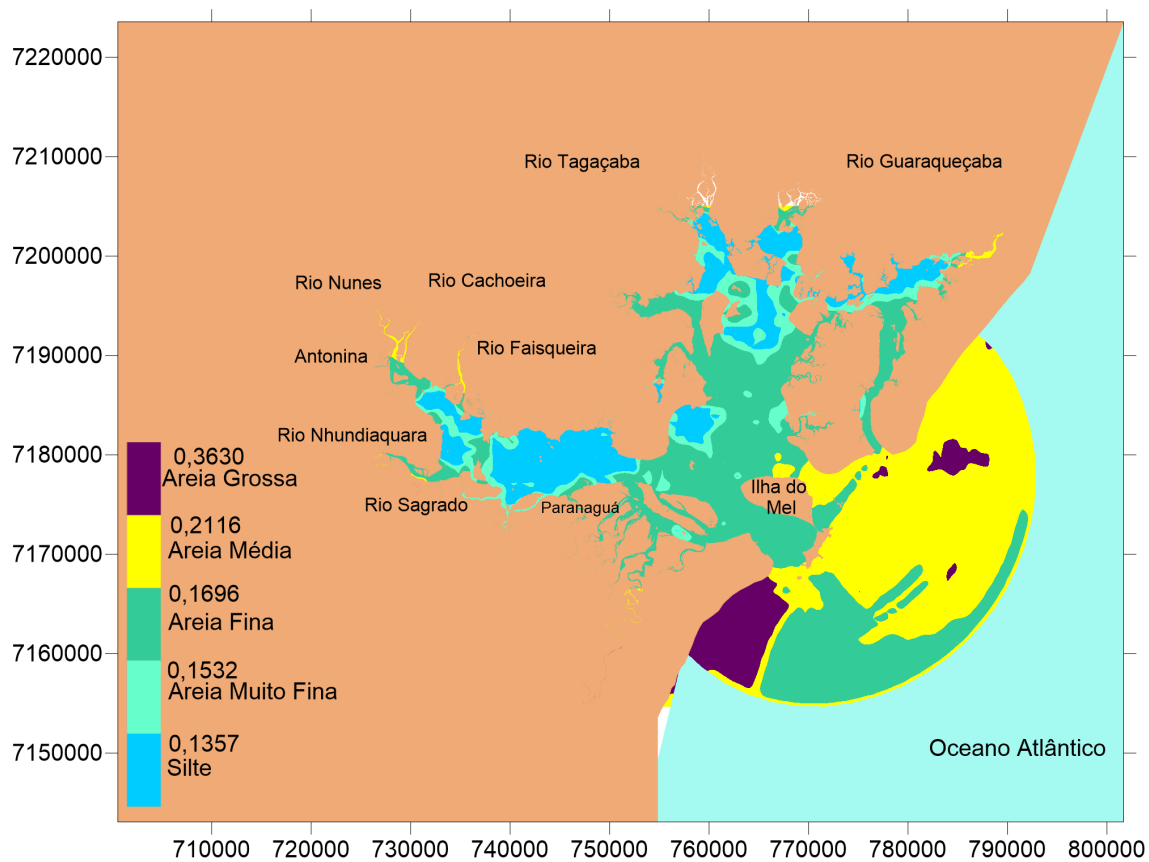
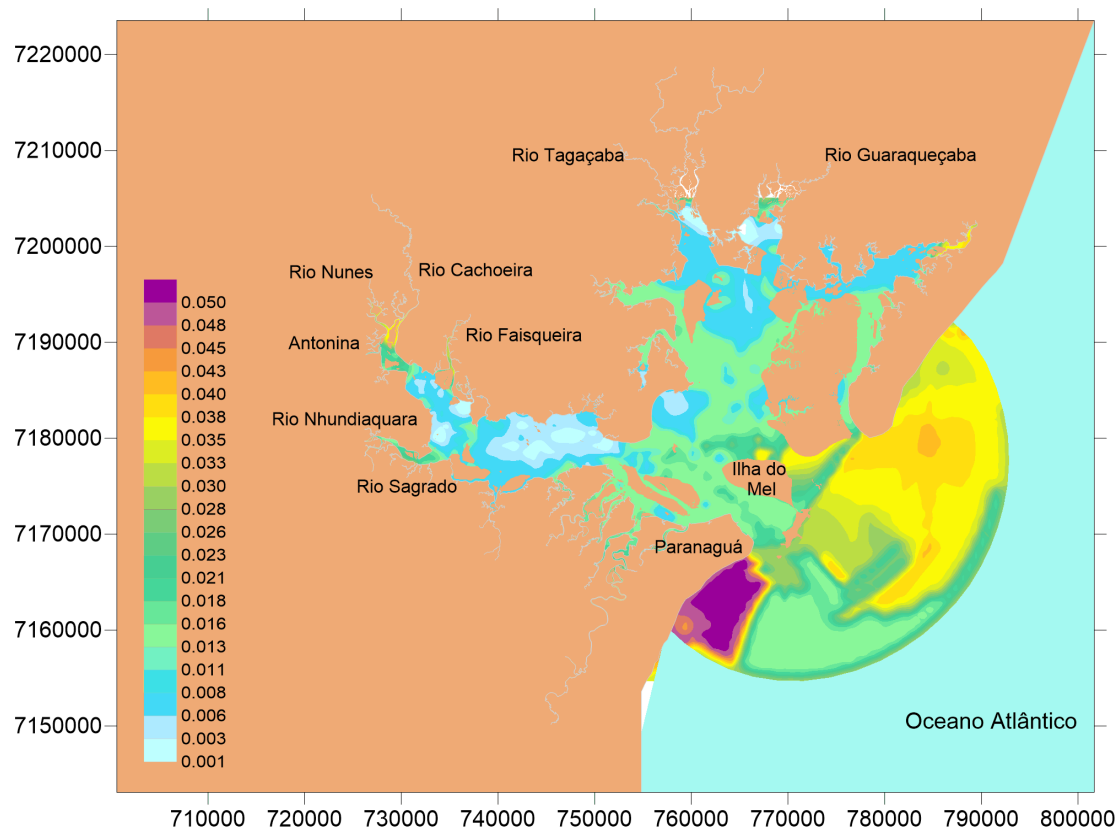
Figura 10 – Carta Náutica de n.º 1822.  
 Fonte: DHN -Diretoria de Hidrografia e Navegação (2015).

### 3.3 Sedimento do fundo

Em todo o domínio do CEP foram definidos valores da amplitude da rugosidade de fundo, necessários para calcular coeficiente de atrito. A definição do tipo de sedimento e sua classificação foram obtidas a partir das informações gerais apresentadas no estudo de Lamour (2007).

Na Figura 11 é apresentada a distribuição espacial dos valores adotados para o parâmetro de rugosidade de fundo. A especificação do tipo de sedimento de fundo está correlacionada com a tensão crítica de mobilidade associada ao sedimento. Na Figura 12 se apresenta a distribuição pelo tipo de sedimento e o limite da tensão crítica de mobilidade do sedimento conforme seu tipo.

A movimentação dos sedimentos depositados no fundo depende de uma tensão aplicada sobre ela. Quando essa tensão é maior que a tensão crítica de mobilidade acontece à movimentação dos sedimentos, ocorrendo assim as mudanças morfológicas. Esta mudança é resultado do balanço do transporte de sedimentos o qual é relacionado com a capacidade das correntes em mover estes sedimentos através da circulação hidrodinâmica, que é simulada pelo modelo de transporte euleriano.



### 3.4 Vazão dos rios

Os rios considerados nas simulações da circulação hidrodinâmica do CEP foram: Cachoeira, Nhundiaquara, Guaraqueçaba, Nunes, Tagaçaba, Faisqueira e Sagrado. Os dados das vazões foram obtidos pelo portal HidroWeb da ANA – Agência Nacional de Águas, e os valores correspondem às vazões médias mensais entre Janeiro a Dezembro de 2009. Destaca-se que para o rio Faisqueira não foram encontrados dados de vazão mensais. Dessa forma, foi adotado um valor permanente de vazão (CUNHA et al., 2015). Os valores estão apresentados na Tabela 4. A Figura 13 mostra a localização dos rios afluentes ao CEP, o código e a localização das estações do Hidroweb.

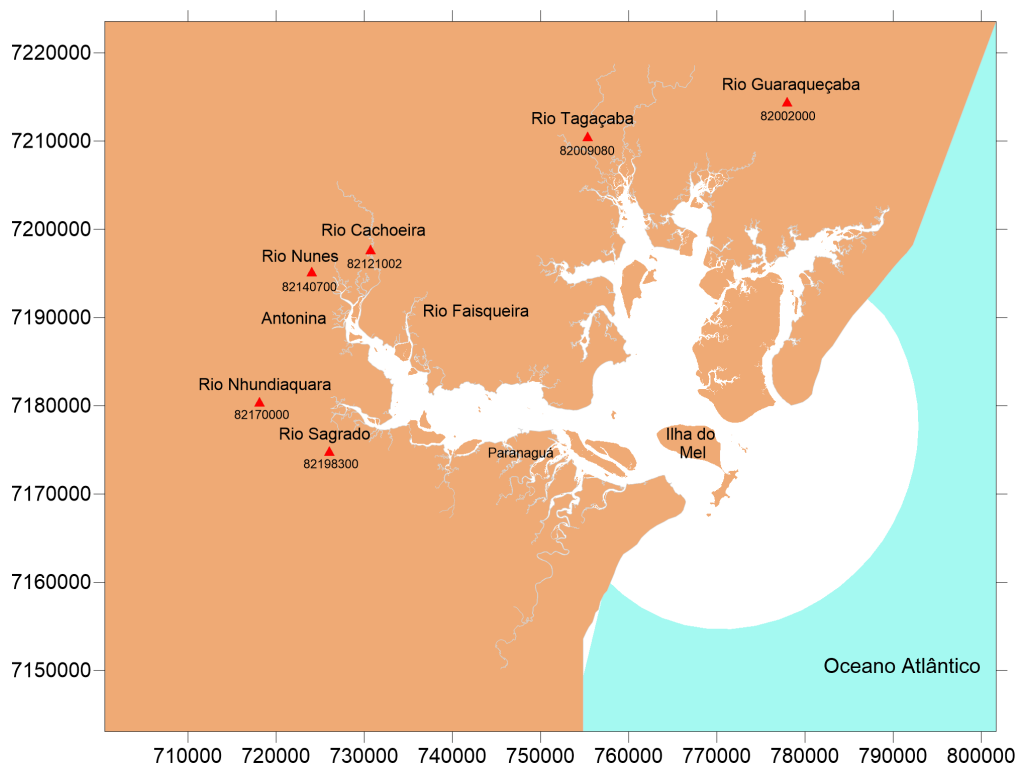


Figura 13 – Localização dos rios afluentes ao CEP, localização e o código das estações, segundo o *Hidroweb*.

Tabela 3 - Vazões médias mensais ( $m^3/s$ ) do ano de 2009 utilizadas para a modelagem da circulação hidrodinâmica do CEP.

Data	Cachoeira [ $m^3/s$ ]	Nhundiaquara [ $m^3/s$ ]	Tagaçaba [ $m^3/s$ ]	Guaraqueçaba [ $m^3/s$ ]	Sagrado [ $m^3/s$ ]	Nunes [ $m^3/s$ ]	Faisqueira [ $m^3/s$ ]
jan/09	54.89	18.58	12.55	11.40	36.30	6.40	10.47
fev/09	46.63	15.47	16.34	15.80	47.10	5.90	10.47
mar/09	52.06	10.72	11.89	12.40	37.40	2.50	10.47
abr/09	36.36	9.10	9.84	9.70	28.10	3.70	10.47
mai/09	26.40	6.42	7.34	5.00	14.50	1.90	10.47
jun/09	29.00	5.67	5.81	3.90	7.80	1.50	10.47
jul/09	44.30	15.14	9.75	7.30	7.20	2.50	10.47
ago/09	23.30	8.92	7.31	4.40	3.50	1.50	10.47
set/09	39.70	18.91	10.14	7.90	1.80	1.30	10.47
out/09	52.27	21.08	10.51	6.50	6.60	1.70	10.47
nov/09	47.91	15.35	9.46	5.20	6.20	1.80	10.47
dez/09	51.22	17.67	9.91	5.60	6.00	2.30	10.47

Fonte: Hidroweb.

Os rios considerados para a validação do modelo de circulação hidrodinâmica foram os mesmos, as vazões médias mensais utilizadas foram do ano de 2011 obtidas no Hidroweb. Novamente destacando que não foram encontradas vazões para o rio Faisqueira, sendo assim, adotados o mesmo valor permanente. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Vazões médias mensais ( $m^3/s$ ) do ano de 2011 utilizadas para a validação do modelo da circulação hidrodinâmica.

Data	Cachoeira [ $m^3/s$ ]	Nhundiaquara [ $m^3/s$ ]	Tagaçaba [ $m^3/s$ ]	Guaraqueçaba [ $m^3/s$ ]	Sagrado [ $m^3/s$ ]	Nunes [ $m^3/s$ ]	Faisqueira [ $m^3/s$ ]
jan/11	58.54	19.55	27.14	13.80	36.32	6.37	10.47
fev/11	60.02	18.28	16.14	14.10	47.14	5.89	10.47
mar/11	49.38	16.42	17.04	13.30	37.43	2.58	10.47
abr/11	33.84	11.15	12.90	12.60	28.09	3.68	10.47
mai/11	28.17	8.55	14.95	8.10	14.47	1.91	10.47
jun/11	29.12	6.21	18.55	5.80	7.80	1.54	10.47
jul/11	26.81	8.46	13.77	5.80	7.23	2.46	10.47
ago/11	29.89	6.14	14.14	4.70	3.54	1.54	10.47
set/11	34.32	10.02	12.20	3.80	1.84	1.28	10.47
out/11	39.73	16.43	12.76	4.30	6.61	1.68	10.47
nov/11	43.67	21.07	22.08	5.60	6.24	1.77	10.47
dez/11	28.61	18.30	12.74	5.20	6.12	2.36	10.47

Fonte: Hidroweb.

### 3.5 Maré

Na simulação do padrão de circulação hidrodinâmico foi considerada a maré astronômica, obtida a partir das constantes harmônicas da estação maregráfica de Paranaguá, retiradas de Marone & Jamiyanna (1997) e outros

componentes adquiridas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras disponibilizados pela FEMAR – Fundação de Estudos do Mar. Na Tabela 5 são mostradas as constantes harmônicas utilizadas, suas amplitudes e fases. A componente da maré meteorológica não foi considerada para aplicação do modelo de circulação hidrodinâmica.

Tabela 5 – Amplitude e fase das constantes harmônicas próximo ao porto de Paranaguá.

Componentes	Amplitude (m)	Fase (Grau)
$Q_1$	0.033	57
$O_1$	0.111	80
$M_1$	0.016	273
$K_1$	0.07	138
$MU_2$	0.04	144
$N_2$	0.074	167
$M_2$	0.491	96
$L_2$	0.029	105
$S_2$	0.333	101
$MO_3$	0.105	61
$M_3$	0.162	262
$MK_3$	0.059	152
$MN_4$	0.067	221
$M_4$	0.16	272
$MS_4$	0.067	356

Fonte: Adaptado de Marone e Jamiyanaa (1997) e FEMAR.

A Figura 14 apresenta a curva de maré prevista para o ano de 2009, e a Figura 15 apresenta a curva de maré prevista para o ano de 2011, obtidas a partir das constantes harmônicas na estação maregráfica de Paranaguá.

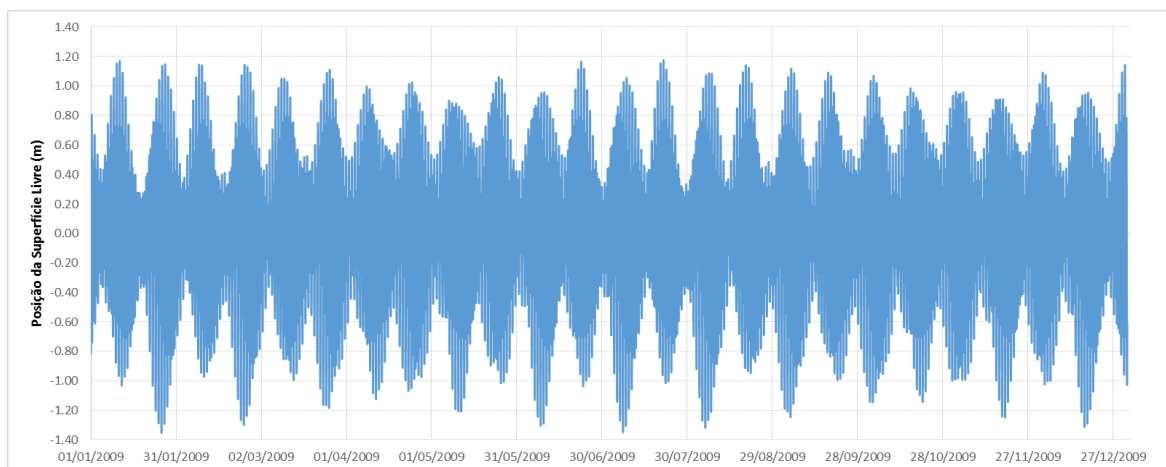


Figura 14 – Curva de maré prevista para o ano de 2009, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por Marone e Jamiyanna (1997) e FEMAR.

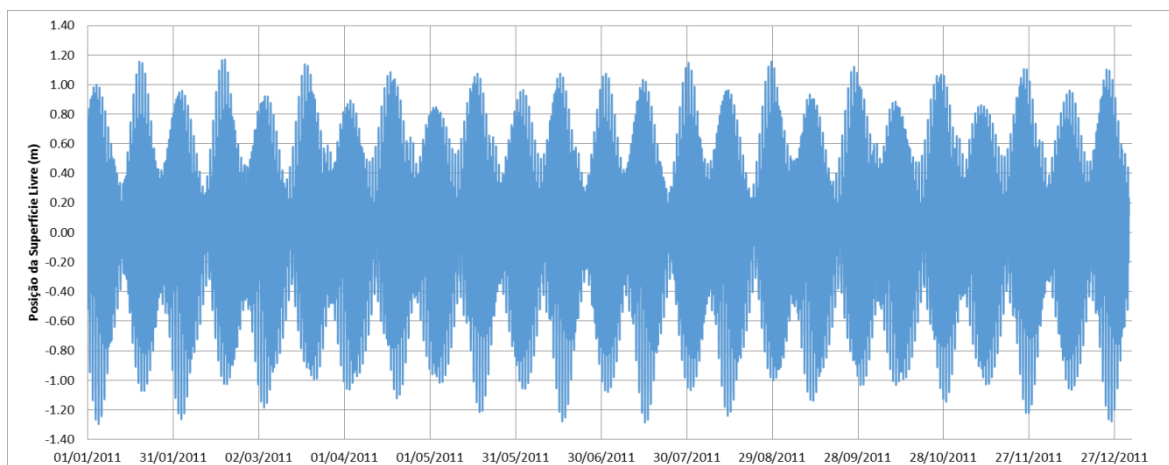


Figura 15 – Curva de maré prevista para o ano de 2011, obtida a partir das constantes harmônicas definidas por Marone e Jamiyanna (1997) e FEMAR.

### 3.6 Vento

Os dados de vento utilizados para a simulação da circulação hidrodinâmica foram obtidos junto ao Instituto Tecnológico SIMEPAR, para o período de 2009, da estação meteorológica instalada na Ilha do Mel. A intensidade e direção dos ventos foram medidas a cada hora; a velocidade média foi de 2,5 m/s, com valores máximos de 12 m/s. O campo de vento foi considerado homogêneo no espaço e variando ao longo do tempo. A rosa dos ventos para esse período é apresentada na Figura 16.

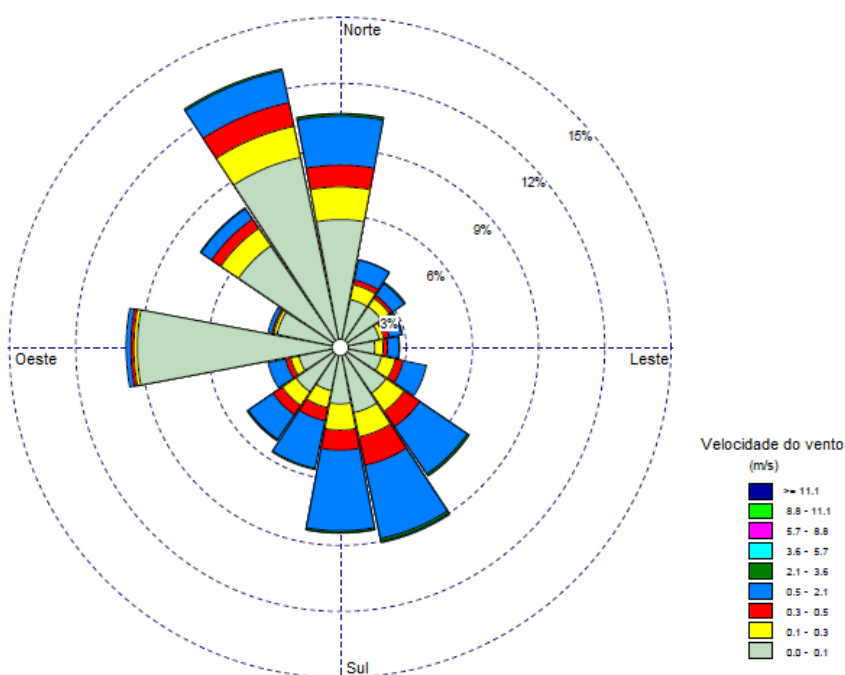


Figura 16 – Rosa de distribuição dos ventos na estação da Ilha do Mel para o ano de 2009.

Para a validação do modelo hidrodinâmico foram impostos valores de vento do ano de 2011. Os valores dos ventos utilizados também foram obtidos da estação meteorológica instalada na Ilha do Mel obtidos junto ao Instituto Tecnológico SIMEPAR. A intensidade e direção dos ventos foram medidas a cada hora; a velocidade média foi de 2,9 m/s, com valores máximos de 10,9 m/s. O campo de vento foi considerado homogêneo no espaço e variando ao longo do tempo. A rosa dos ventos para este período é apresentada pela Figura 17.

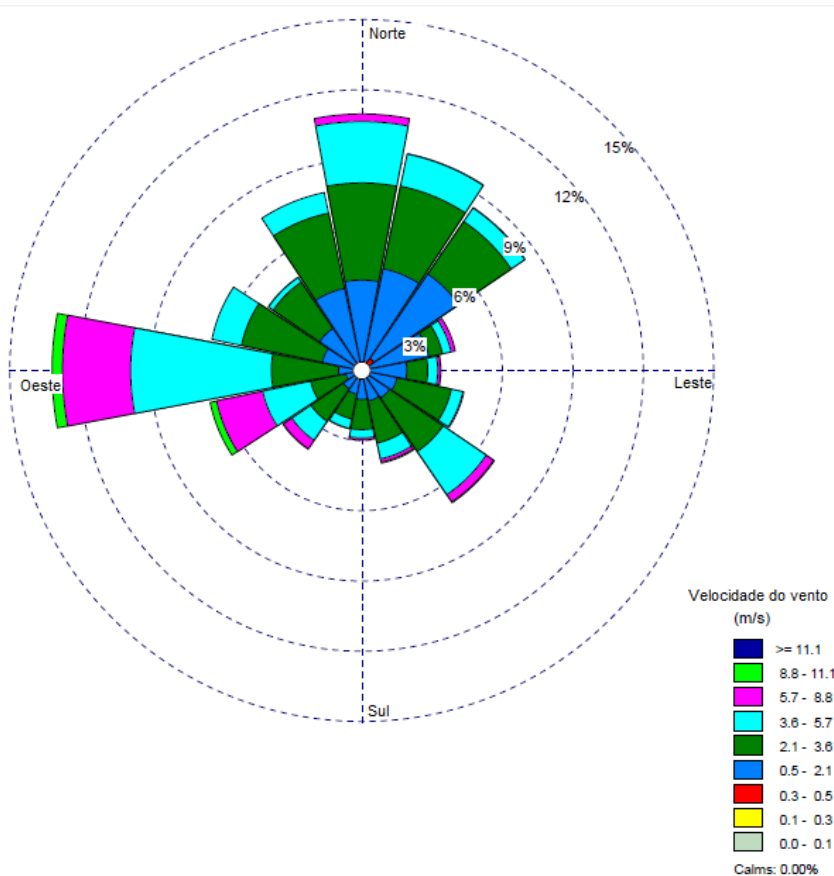


Figura 17 – Rosa de distribuição dos ventos na estação da Ilha do Mel para o ano de 2011.

### 3.7 Material em suspensão nos rios afluentes

Os valores da concentração do material em suspensão nos rios foram obtidos através do ajuste das séries históricas obtidas no portal *Hidroweb*. Esse ajuste foi necessário, pois a base de dados não disponibilizava todos os valores de concentrações mensais para o ano de 2009. Sendo assim, foi realizada uma interpolação linear com dados entre os anos de 1982 e 2014. Os valores utilizados são apresentados pela Tabela 6. Novamente para o rio

Faisqueira adotou-se um valor constante, devido à condição imposta em relação à vazão líquida.

Tabela 6 - Concentrações do material suspenso utilizadas para a modelagem do transporte de sedimentos coesivos no CEP.

Data	Cachoeira [mg/l]	Nhundiaquara [mg/l]	Tagaçaba [mg/l]	Guaraqueçaba [mg/l]	Sagrado [mg/l]	Nunes [mg/l]	Faisqueira [mg/l]
jan/09	27.92	27.61	34.42	33.24	45.95	12.43	13.73
fev/09	25.28	24.39	38.33	37.77	57.12	12.27	13.73
mar/09	27.01	19.48	33.75	34.27	47.09	11.19	13.73
abr/09	22.00	17.80	31.63	31.49	37.46	11.57	13.73
mai/09	18.82	15.03	29.06	26.65	23.39	11.00	13.73
jun/09	19.65	14.25	27.49	25.52	16.46	10.87	13.73
jul/09	24.53	24.05	31.54	29.02	15.84	11.19	13.73
ago/09	17.83	17.61	29.03	26.03	12.01	10.87	13.73
set/09	23.07	27.95	31.95	29.64	10.25	10.81	13.73
out/09	27.08	30.20	32.32	28.20	15.21	10.93	13.73
nov/09	25.69	24.27	31.25	26.86	14.80	10.96	13.73
dez/09	26.75	26.67	31.70	27.27	14.59	11.12	13.73

### 3.8 Etapa 1: aplicação do modelo de circulação hidrodinâmico

O modelo de circulação hidrodinâmica aplicado foi no módulo 2DH, considerando que o CEP apresenta padrões de estratificação fracos e escalas verticais menores que as horizontais e o escoamento de interesse ser mais predominante na horizontal (CUNHA et al., 2015). Como resultado, é possível obter as componentes das velocidades médias na vertical das direções Leste-Oeste ( $x$ ) e Norte-Sul ( $y$ ),  $U(x,y,t)$  e  $V(x,y,t)$ , respectivamente, e a posição da superfície livre  $\zeta(x,y,t)$ .

A discretização espacial foi construída a partir de uma malha com 1606 elementos finitos (7216 nós), utilizada anteriormente no estudo de Cunha et al. (2015). Na Figura 18 é apresentado o domínio de modelagem e a malha utilizada, incluindo a localização dos principais rios afluentes ao CEP.



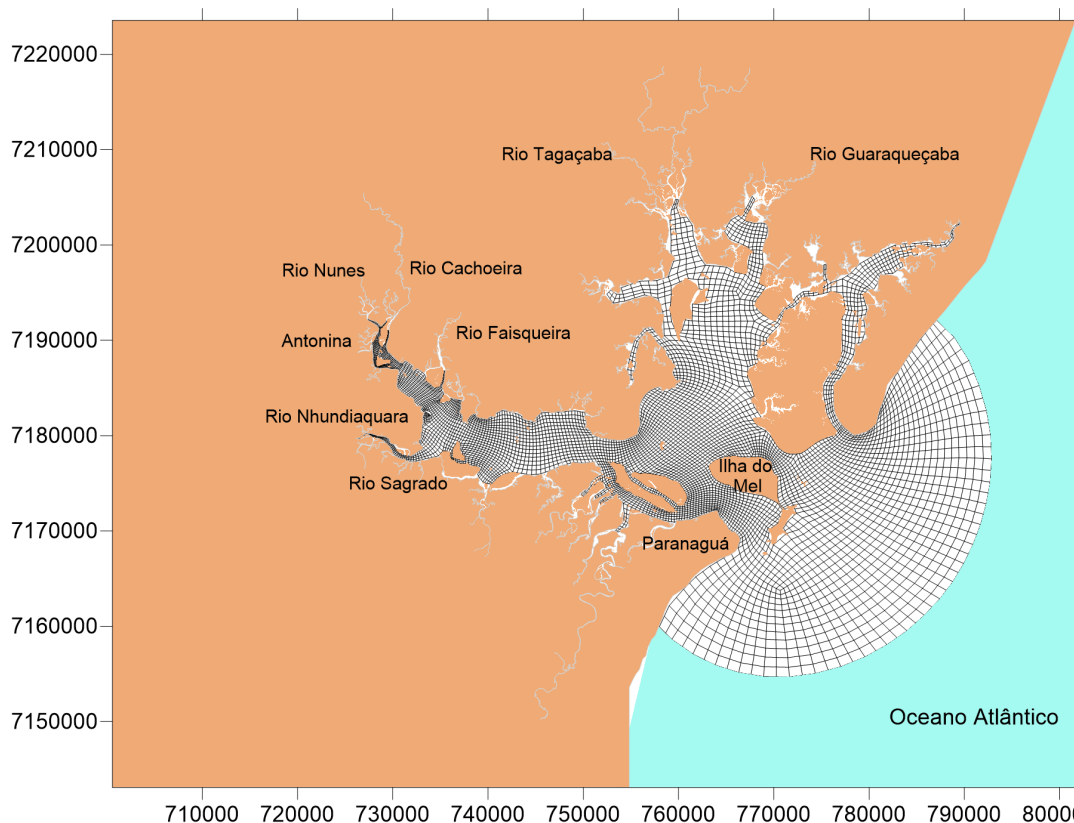


Figura 18– Discretização do domínio do Complexo Estuarino de Paranaguá, com a localização dos principais rios afluentes ao CEP.

Para a condição da fronteira de terra (compreende todos os nós de margem do CEP), foi considerado com velocidade normal igual a zero. Entretanto, nos nós posicionados nas desembocaduras de rios foram fornecidos os dados de vazão (Tabela 4) ao longo do período de simulação.

A imposição das condições no contorno aberto é importante por determinar a influência de áreas externas à área do domínio. No contorno aberto são especificadas as elevações da superfície livre, obtidas a partir das constantes harmônicas, descritas na Tabela 5.

A condição inicial adotada consiste em especificar o campo de velocidade nulo em todos os pontos de grade, e o campo de elevação igual a zero em relação ao nível médio do mar, em todo o domínio. Essa condição é chamada de “partida a frio” que é utilizada quando não há nenhum resultado antecedente adequado para ser utilizado como condição inicial. Sendo assim, é necessário um tempo relativamente curto para aquecimento do modelo. O período de aquecimento apresenta resultados que podem não ser de interesse como resultado prático.

### 3.9 Etapa 2: calibração e validação do modelo

Para a melhor confiabilidade dos resultados da circulação hidrodinâmica foi realizada a comparação dos valores obtidos pelo SisBAHIA<sup>®</sup> com os valores medidos em campo. O modelo de circulação hidrodinâmica deve representar adequadamente a variação da posição da superfície livre e das correntes, na região de interesse, sob diferentes condições, como por exemplo, marés de sizígia e quadratura. Segundo Rosman (2015), o erro para a calibração da posição da superfície livre com o SisBAHIA<sup>®</sup> devem ser inferiores a 5%. Isto indica que a batimetria, as condições de contorno e as vazões gerais estão corretamente definidas.

No Canal da Coatinga, entre os dias 24/02/2009 e 27/03/2009, foram feitas medições, com intervalos de 15 minutos, da posição da superfície livre (níveis de água), com um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) SeaBird SBE37; o local é identificado como estação Est\_N (Figura 19). Medições de correntes foram realizadas entre os dias 04/03/2009 e 07/03/2009 (período de quadratura) e entre 11/03/2009 e 14/03/2009 (período de sizígia), com um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) SONTEK de frequência 1000 KHz, ao longo da coluna d'água a cada 0,5 m, obtendo valores a cada 10 minutos, no Canal da Coatinga; o local identificados como estação Est\_C (Figura 19).

O fato do Canal da Coatinga ser estreito e raso impõe certas dificuldades na comparação dos resultados da posição da superfície livre e das componentes da velocidade. Além disso, há falta de outros locais de medição o que também proporciona dificuldade na calibração. Mesmo assim, a comparação foi realizada com os dados disponíveis desta estação.

Para realizar a comparação das correntes, foram feitas promediações dos dados medidos das componentes de velocidades Leste-Oeste, ao longo da coluna d'água.



Figura 19 – Localização da estação Est\_N, onde dados de níveis (quadrado) e a Est\_C, onde dados de corrente (círculo) foram medidos e usados no processo de calibração.

A qualidade do resultado do transporte de sedimentos está fortemente relacionada com a acurácia do modelo hidrodinâmico, por isso é necessário, que, além da calibração, seja feita uma validação, com outro conjunto de dados que confirmem o bom desempenho do modelo. Para tanto, o modelo foi calibrado para o conjunto de dados do ano de 2009, e validado utilizando os mesmos parâmetros de 2009 com os dados de vazões dos rios e ventos do ano de 2011. Para a validação do modelo de circulação hidrodinâmico foi comparado os resultados da superfície livre obtidos com o SisBAHIA<sup>®</sup> e valores medidos próximo ao porto de Paranaguá e a Ponta do Félix (Figura 20), entre os dias 10/07/2011 e 20/07/2011.

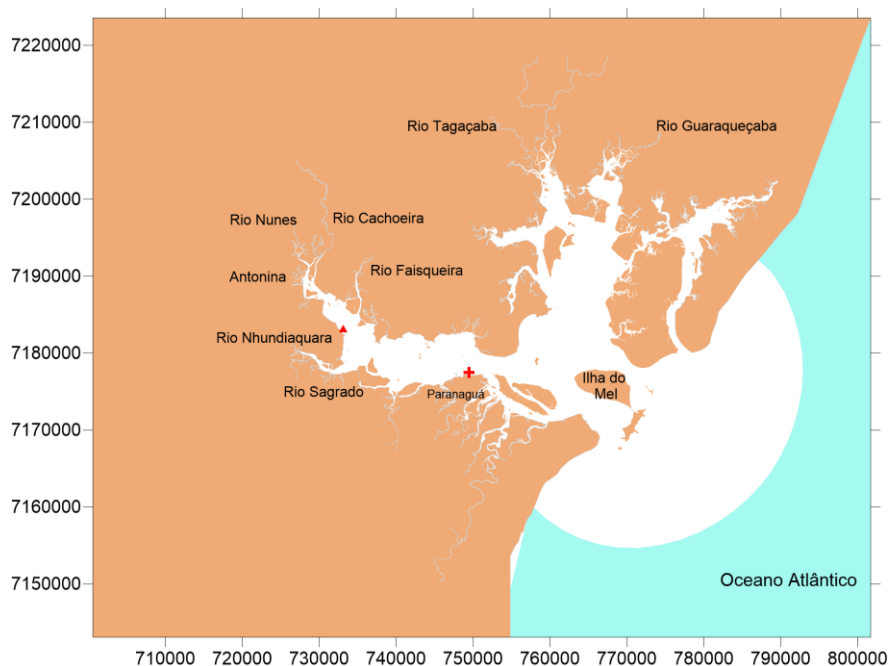


Figura 20 – Localização das estações onde dados de níveis foram medidos para o processo de validação: porto de Paranaguá (cruz) e a Ponta do Félix (triângulo).

### 3.10 Etapa 3: aplicação do modelo de transporte euleriano

O modelo de transporte Euleriano do SisBAHIA<sup>®</sup> permite a determinação de tendência de deriva de sedimentos, substâncias dissolvidas ou partículas flutuantes. Após a simulação da circulação hidrodinâmica é necessário realizar o acoplamento com o modelo de transporte euleriano, onde alguns parâmetros e os resultados obtidos na circulação hidrodinâmica, tais como elevação de nível, componentes da velocidade e valores de viscosidade turbulenta são disponibilizadas como informações para o modelo de transporte.

O SisBAHIA<sup>®</sup> permite calcular tanto a concentração do material particulado em suspensão (MPS) quanto a massa depositada/erodida do material no fundo. A modelagem do transporte do MPS é regida pelos processos de sedimentação e ressuspensão. A perda de massa por sedimentação é calculada a partir da velocidade de sedimentação; Mayerle et al. (2015), simulou o transporte de sedimentos no Complexo Estuarino de Paranaguá utilizando o modelo Delft3D, e estudando resultados obtidos por outros pesquisadores, concluiu que a velocidade de sedimentação do CEP pode ser admitida igual a 0,5 mm/s. Nesse trabalho foram realizados testes com velocidade de sedimentação constante de 0,5 mm/s, e velocidade de sedimentação variável, calculada pelo SisBAHIA<sup>®</sup>.

O transporte de sedimento de fundo ocorre devido à ação dos processos hidrodinâmicos e depende da tensão crítica de mobilidade. Se a tensão de fundo é superior à tensão crítica de mobilidade deve ocorrer o transporte dos sedimentos; para os valores da tensão de fundo inferior, os grãos ficam imóveis, ou, se estiverem em movimento, tendem a se depositar.

Como já apresentado, o modelo de transporte euleriano pode calcular o transporte do sedimento por diversas fórmulas. Para escolher a formulação que deveria ser usada no presente trabalho, optou-se por utilizar a indicação apresentada em Khorram & Ergil (2010), que utilizaram 52 fórmulas de transporte de arrasto para sedimentos não coesivos aplicadas em diversos rios, e quando os resultados calculados foram comparados com o conjunto de dados medidos, a formulação que apresentou menores diferenças para o transporte de arrasto foi a de Van Rijn (1984), assim, foi escolhida para ser usada neste trabalho.

A simulação do transporte do MPS foi realizada para um período de 30 anos. Para isso foi considerado 30 ciclos de 365 dias (um ano); para cada ciclo foi obtido os padrões de circulação obtidos pelo modelo hidrodinâmico, para o ano de 2009. Foi realizado somente o transporte do material particulado em suspensão oriundos dos rios, sem o movimento do sedimento do fundo, verificando assim, os possíveis locais de sedimentação. As fontes do MPS foram os rios afluentes já citados e as concentrações descritas na Tabela 6.

A segunda análise considera somente a movimentação do sedimento de fundo, com concentração do MPS igual a zero nos rios afluentes. Por último foi realizada a simulação do MPS oriundos dos rios, com uma vazão sólida média permanente para o ano de 2009, que representa a vazão líquida multiplicada pela concentração de MPS, juntamente com a movimentação de fundo. Para essas análises, foram utilizados o fator de aceleração morfológica do SisBAHIA<sup>®</sup>, que permite estimar a evolução morfológica de fundo de modo acelerado, e usando o efeito de encouraçamento, que é o processo que dificulta o movimento da camada inferior do material. Para identificar o assoreamento e/ou erosão no canal da Galheta foram analisados os resultados em cinco estações distintas no canal (Figura 21).

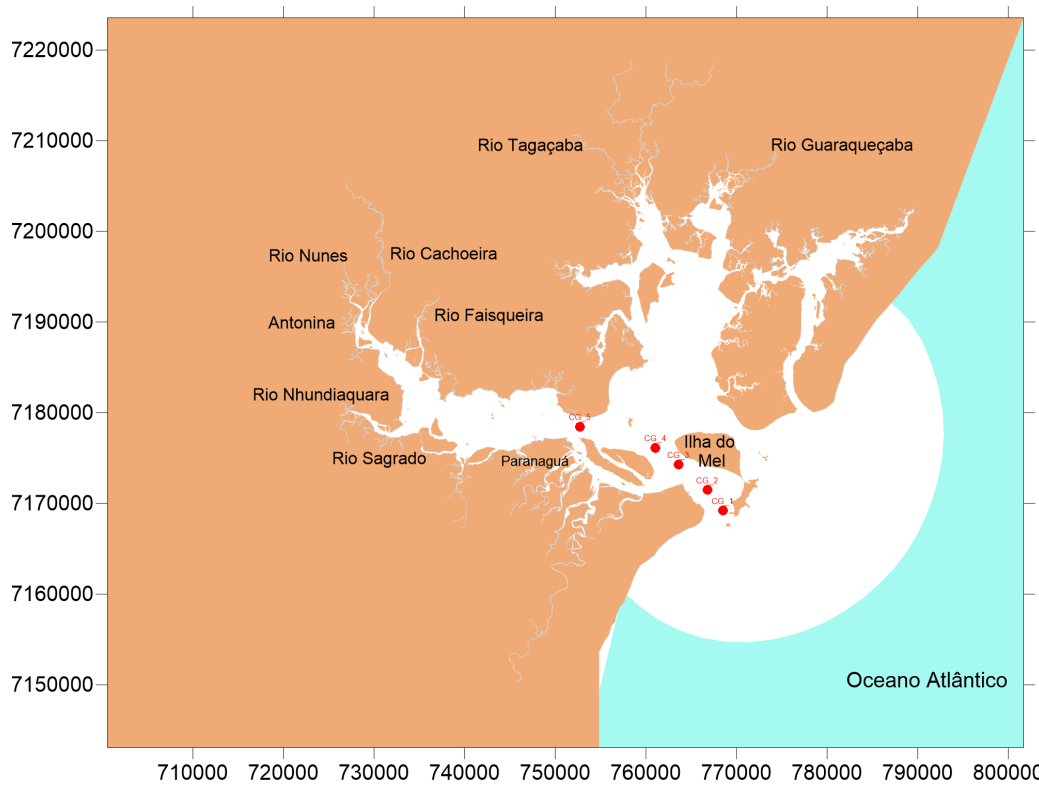


Figura 21 – Localização das estações no canal da Galheta para observação dos processos de sedimentação e/ou erosão.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Etapa 1: aplicação do modelo de circulação hidrodinâmico

A simulação da circulação da hidrodinâmica bidimensional do Complexo Estuarino de Paranaguá foi realizada para o ano de 2009 e gerou um conjunto de valores de posição da superfície livre e das componentes das velocidades, permitindo assim a compreensão da circulação hidrodinâmica. Primeiramente foi realizada uma análise qualitativa para verificar a propagação da onda de maré e as componentes de velocidades no CEP. Os parâmetros usados na simulação da circulação hidrodinâmica estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no modelo de circulação hidrodinâmica para o ano de 2009.

<b>Parâmetros do modelo de circulação hidrodinâmica</b>	<b>Valores</b>
$\Delta t$ (Passo de tempo - Segundos)	20
Constante de Von Karman	0.4040
Número de Courant Máximo	5.9
Número de Courant Médio	0.7

Foram distribuídas quatro estações, onde os resultados do modelo são apresentados: Est\_1, no oceano, Est\_2, no canal da Galheta, Est\_3, próximo ao porto de Paranaguá e Est\_4, próximo a Antonina (Figura 22). Essa divisão foi realizada com objetivo de analisar o comportamento da circulação hidrodinâmica do CEP nas suas três zonas: zona estuarina fluvial (Est\_4), zona de turbidez máxima (Est\_3), zona costeira (Est\_1) e no canal da Galheta (Est\_2).

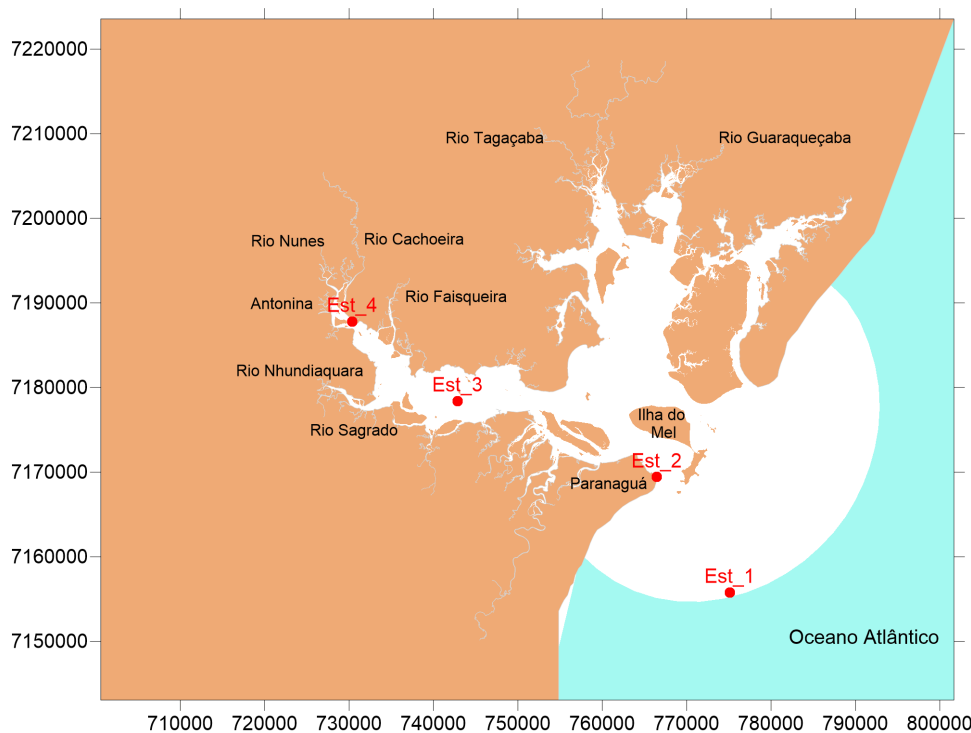


Figura 22 – Localização das estações dos dados obtidos pela simulação do modelo de circulação hidrodinâmico durante o ano de 2009.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que a onda de maré sofre uma amplificação da sua amplitude à medida que entram para o interior da baía de Antonina. Um detalhe entre os dias 16/06/2009 e 26/06/2009 para os resultados da posição da superfície livre obtidos pelo SisBAHIA<sup>®</sup> (Figura 23), nas quatro estações mostram um atraso na onda de maré, com uma diferença de fase entre as estações Est\_1 e Est\_4 de aproximadamente 1 hora e trinta minutos. Cunha et al. (2015) e Marone e Jamiyanna (1997) também verificaram o mesmo intervalo de atraso.

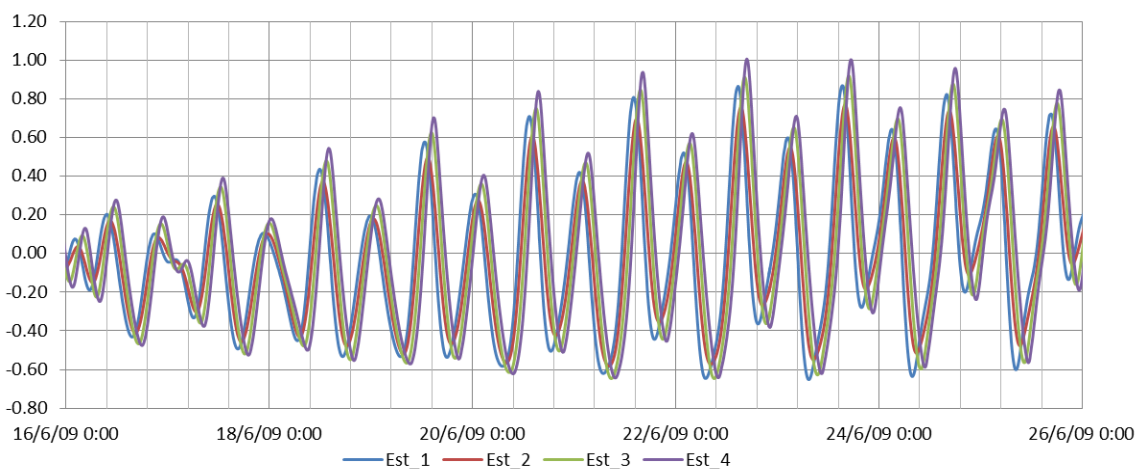


Figura 23 – Posição da superfície livre (m) obtidas pelo SisBAHIA<sup>®</sup> nas estações Est\_1, Est\_2, Est\_3, Est\_4, em detalhe entre 16/06/2009 e 26/06/2009.



Apresenta-se, nas Figuras 24 e 25, as componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, das velocidades de correntes obtidas pelo SisBAHIA<sup>®</sup> nas quatro estações. A Est\_1, localizada na região mais externa a baía, possui componentes de velocidades Leste-Oeste e Norte-Sul mais baixas, devido sua maior profundidade. Na Est\_2, próxima a embocadura do CEP, a componente Norte-Sul é maior devido à orientação do canal. Sendo assim, a componente da velocidade da Est\_2 (Figura 24 e 25) é menor na direção Leste-Oeste e maior na direção Norte-Sul.

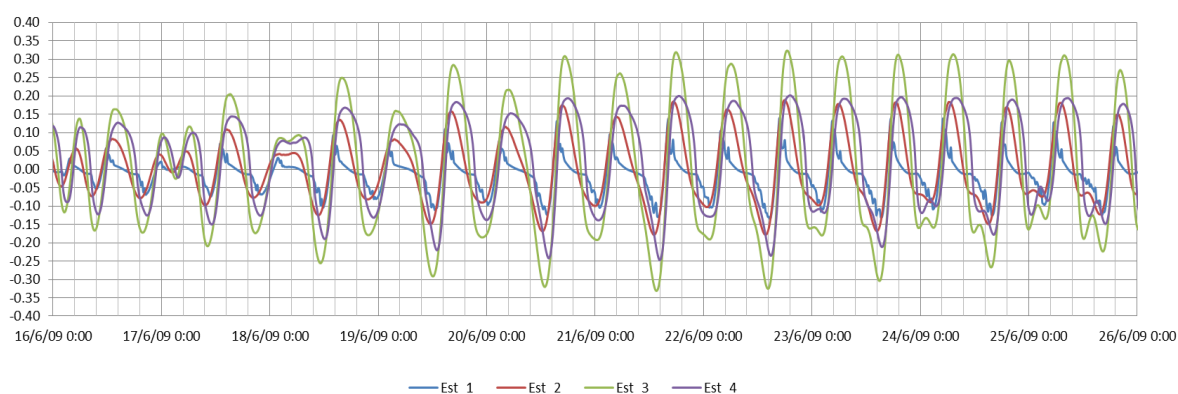


Figura 24 – Componentes de velocidades Leste-Oeste obtidas pelo SisBAHIA, em m/s, nas estações Est\_1, Est\_2, Est\_3, Est\_4, no período entre 16/06/2009 e 26/06/2009.

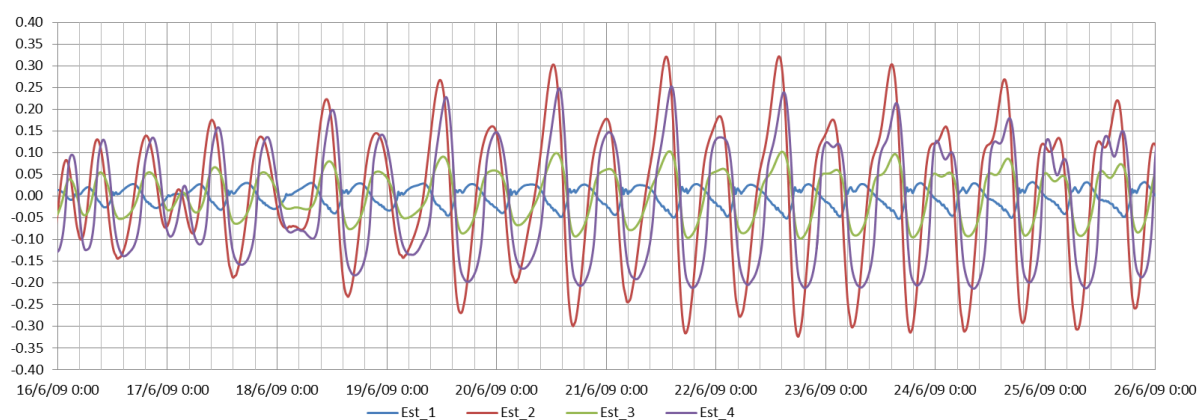


Figura 25 – Componentes de velocidades Norte-Sul obtidas pelo SisBAHIA, em m/s, nas estações Est\_1, Est\_2, Est\_3, Est\_4, no período entre 16/06/2009 e 26/06/2009.

Nas Figuras 26 e 27 são apresentados os padrões espaciais de velocidades nos instantes de meia maré vazante e meia maré enchente, respectivamente, no Complexo Estuarino de Paranaguá. Nos campos de velocidades apresentados verifica-se forte relação com a batimetria. Em ambos os períodos é possível observar uma intensificação das correntes nos locais de estrangulamento devido à diminuição da área, e da influência da orientação dos canais.

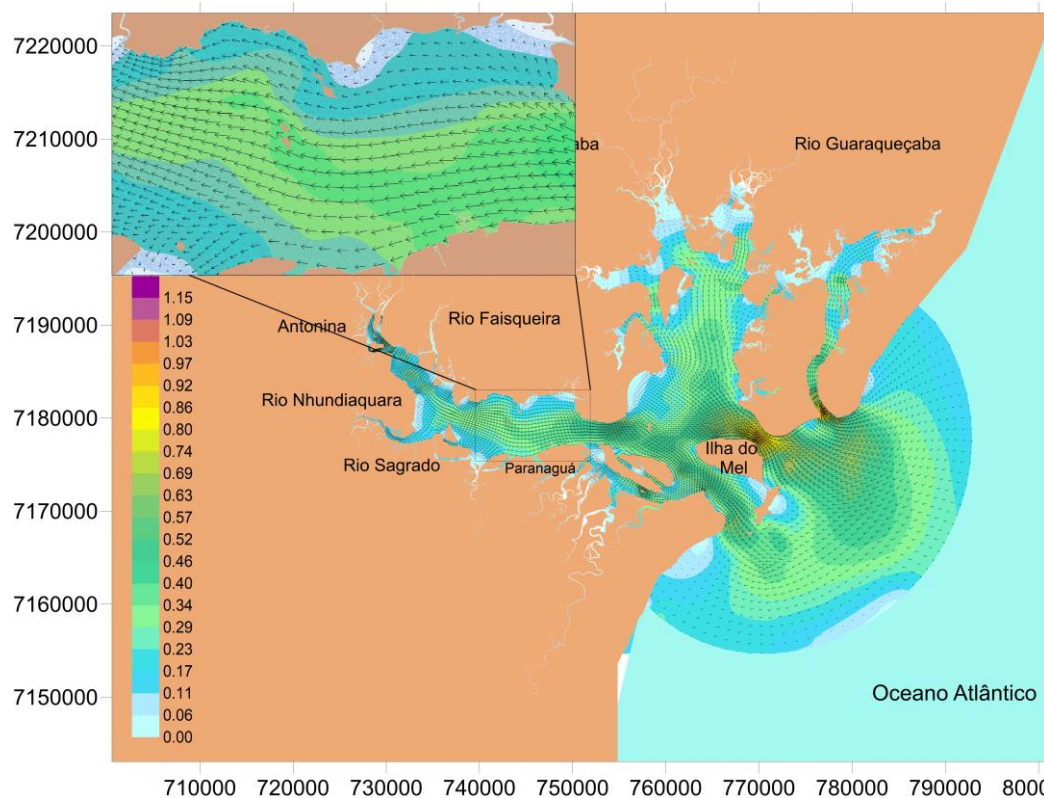


Figura 26 – Campo de corrente no domínio do modelo no instante de meia maré enchente no dia 21/06/2009 às 13:00, com destaque para a região da baía de Paranaguá, mostrando a componente Leste-Oeste mais significativa que a Norte-Sul.

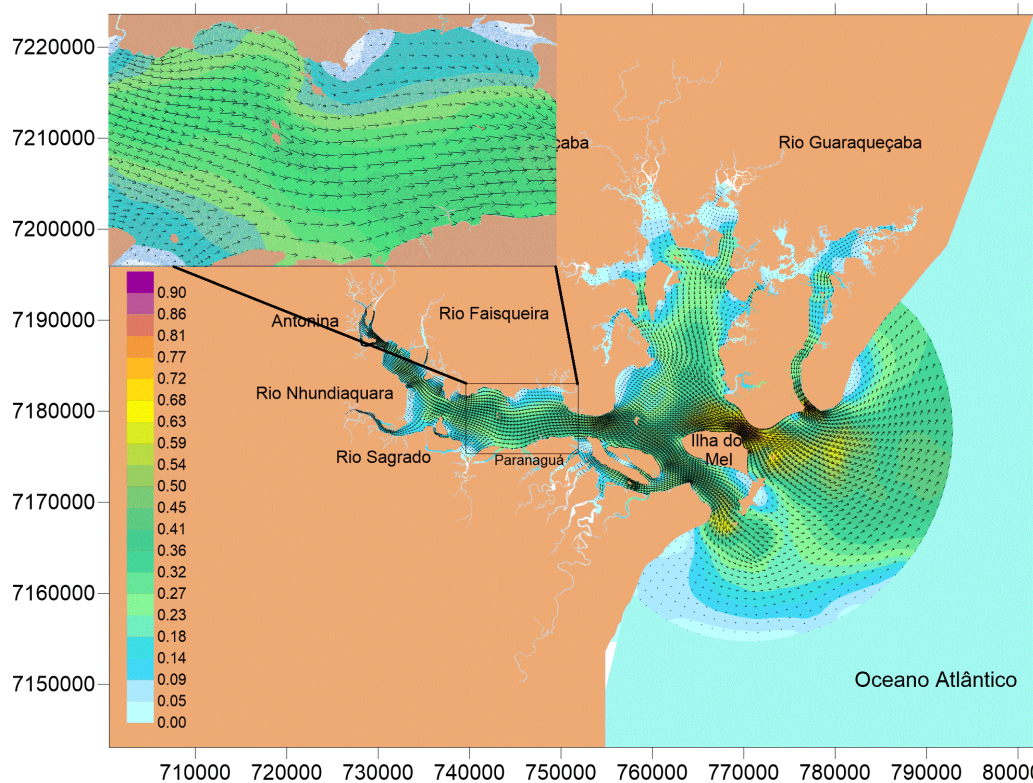


Figura 27 – Campo de corrente no domínio do modelo no instante de meia maré vazante no dia 20/06/2009 às 17h00min, com destaque para a região da baía de Paranaguá, mostrando a componente Leste-Oeste mais significativa que a Norte-Sul.

## 4.2 Etapa 2: calibração e validação do modelo

Com o intuito de calibrar o modelo de circulação hidrodinâmica foram realizados ajustes em relação ao nível médio da baía e, posteriormente, comparações entre os valores da posição da superfície livre e das componentes da velocidade, obtidos com o SisBAHIA<sup>®</sup>, e os valores medidos em campo. A Figura 28 mostra a comparação entre os resultados do modelo e os valores medidos no período de quadratura (28/02/2009 a 07/03/2009) e a Figura 29, no período de sizígia (08/03/2009 a 16/03/2009).

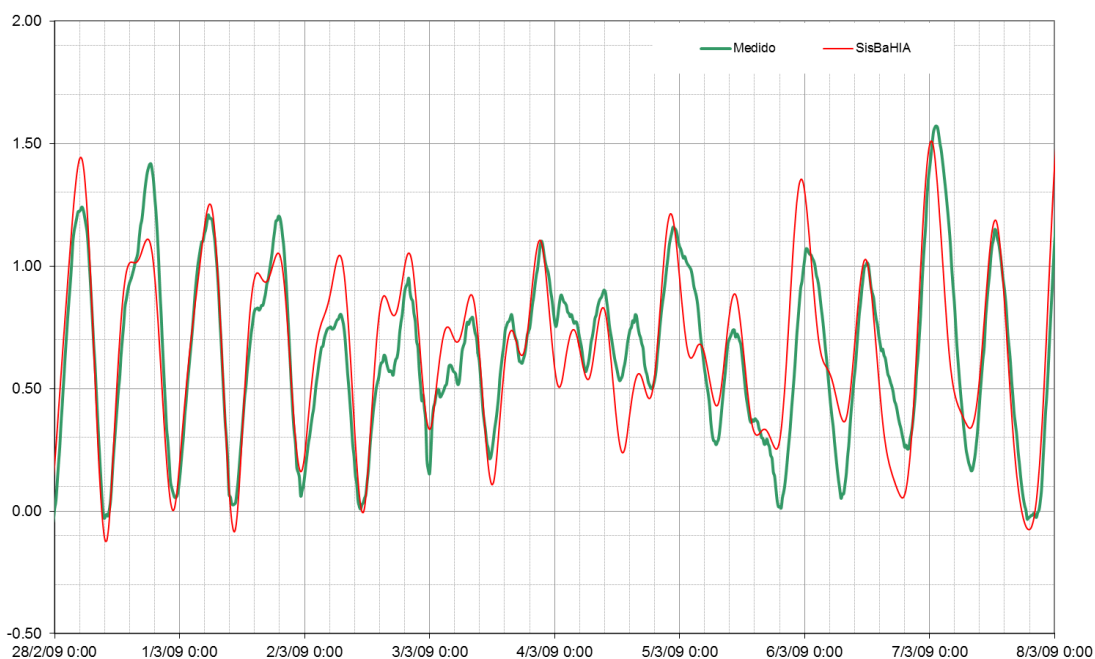


Figura 28 – Posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_N), no período de quadratura.

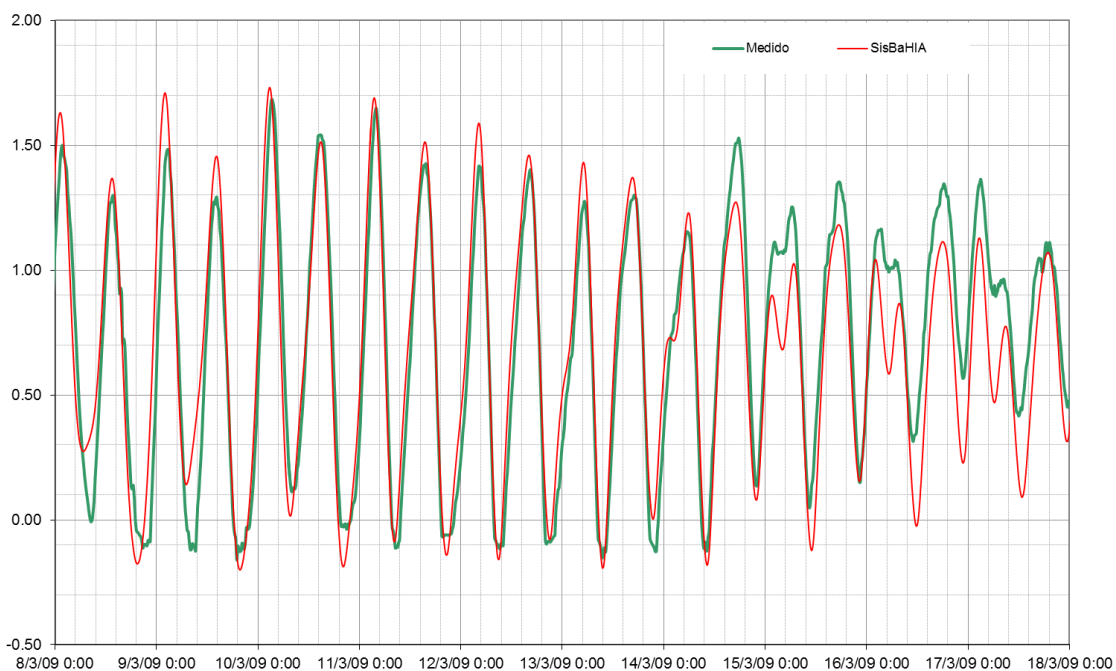


Figura 29 – Posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_N), no período de sizígia.

Observa-se que houve uma boa concordância em relação à fase, porém, diferenças de amplitude podem ser observadas. As maiores diferenças aconteceram no período de quadratura, provavelmente devido à influência da rugosidade do fundo, em eventos de maré baixa. No período de sizígia também nota-se uma boa concordância em relação à fase. O módulo das diferenças entre os valores da posição da superfície livre obtidos pelo modelo e os dados medidos podem ser observadas pelas Figuras 30 e 31.

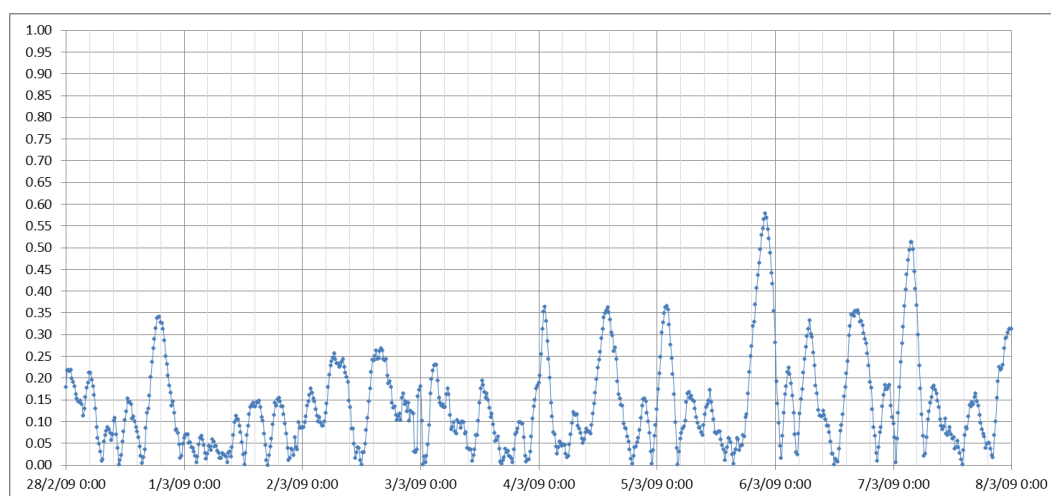


Figura 30 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_N), no período de quadratura.



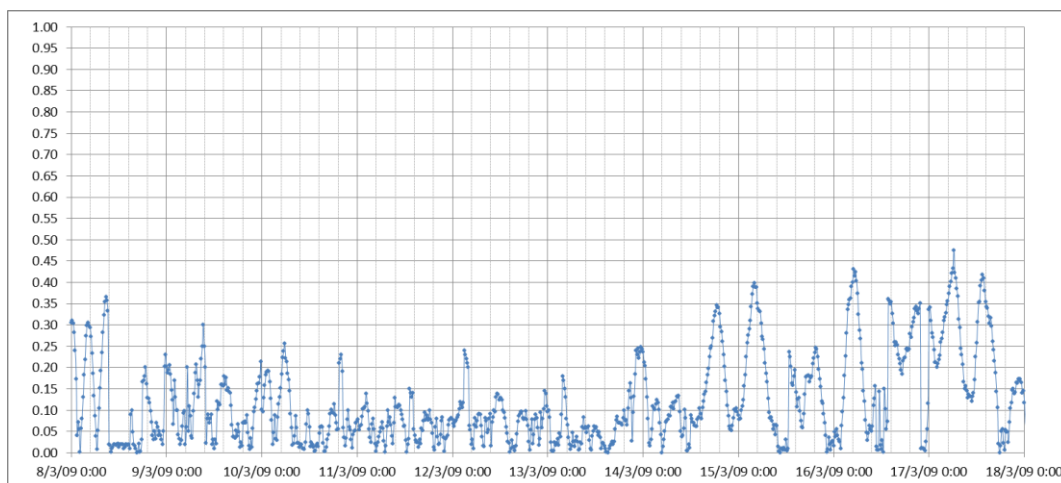


Figura 31 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA®, e os dados medidos (Est\_N), no período de sizígia.

Rosman (2015) observa que os valores de posição da superfície livre (amplitudes e fases) estariam calibrados se os erros forem inferiores a 5%. As maiores diferenças acontecem na preamar e na baixa-mar, nos demais instantes os erros apresentam valores satisfatórios. No entanto, entre os dias 14/03 e 18/03, observa-se uma intensificação das diferenças (Figura 31) e uma elevação do nível médio de cerca de 30 cm; variações de nível médio podem estar relacionadas à presença de um evento meteorológico. O erro médio no período de quadratura para a posição da superfície livre foi de 12%, um pouco acima dos valores indicados por Rosman (2015). No período da sizígia, o erro médio foi de 10%; considerando apenas o período entre os dias 08/03 e 14/03, sem contabilizar a possível ocorrência do evento meteorológico, o erro médio observado foi de 4%.

É possível identificar um evento meteorológico a partir de análises da velocidade e direção do vento e das variações da pressão atmosférica. Observando os valores medidos de pressão atmosférica, velocidade do vento e temperatura do ar na estação da Ilha do Mel (Figura 32), no período em questão, observa-se um aumento significativo nos valores de pressão atmosférica e uma diminuição da temperatura do ar, a partir do dia 15/03, podendo indicar uma condição de maré meteorológica típica de entrada de frente fria. Marone e Camargo (1994) verificaram a ocorrência de maré meteorológica no Complexo Estuarino de Paranaguá em 1993 e relacionaram com a variação da pressão atmosférica, e afirmaram ainda que, o CEP pode

apresentar uma variação no nível médio do mar ocasionada por evento de maré meteorológica.

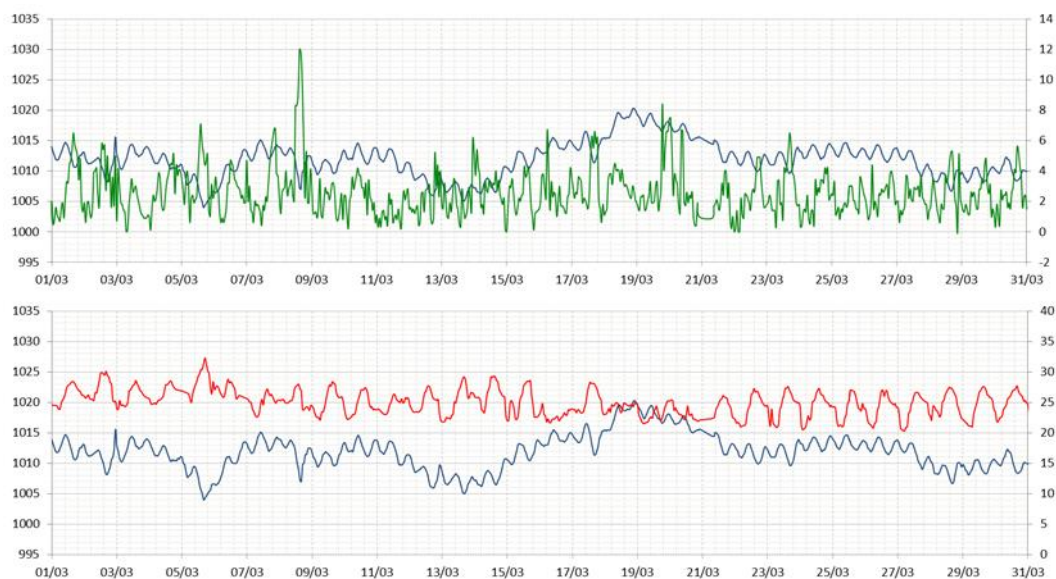


Figura 32 – Valores medidos da pressão atmosférica, em hPa, no eixo esquerdo (azul), velocidade do vento, em m/s, no eixo direito superior (verde) e temperatura do ar, em °C, no eixo direito inferior (vermelho) entre os 01/03/2009 e 31/03/2009.

Na Figura 33 é mostrada as comparações das componentes das velocidades Leste-Oeste mais significativas obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_C), no período de quadratura. A componente Leste-Oeste das velocidades obtidas pelo SisBAHIA<sup>®</sup> quando comparadas como os dados medidos mostrou uma pequena diferença de fase, porém, houve uma significativa diferença na amplitude. Essa diferença pode ter ocorrido devido o Canal da Coatinga ser estreito e raso, impondo certas dificuldades na comparação dos resultados das componentes da velocidade. A estação onde foram feitas as medições está localizada em um canal raso, estreito e com valores da componente de velocidade Norte-Sul baixos. Locais rasos e com baixa velocidades apresentam muitas flutuações de pequena escala que o modelo não é capaz de reproduzir, e por ser um canal estreito, a batimetria é muito variável e o modelo tende a suavizar a batimétrica através da interpolação, dificultando uma boa concordância entre os dados medidos e os dados obtidos pelo modelo.

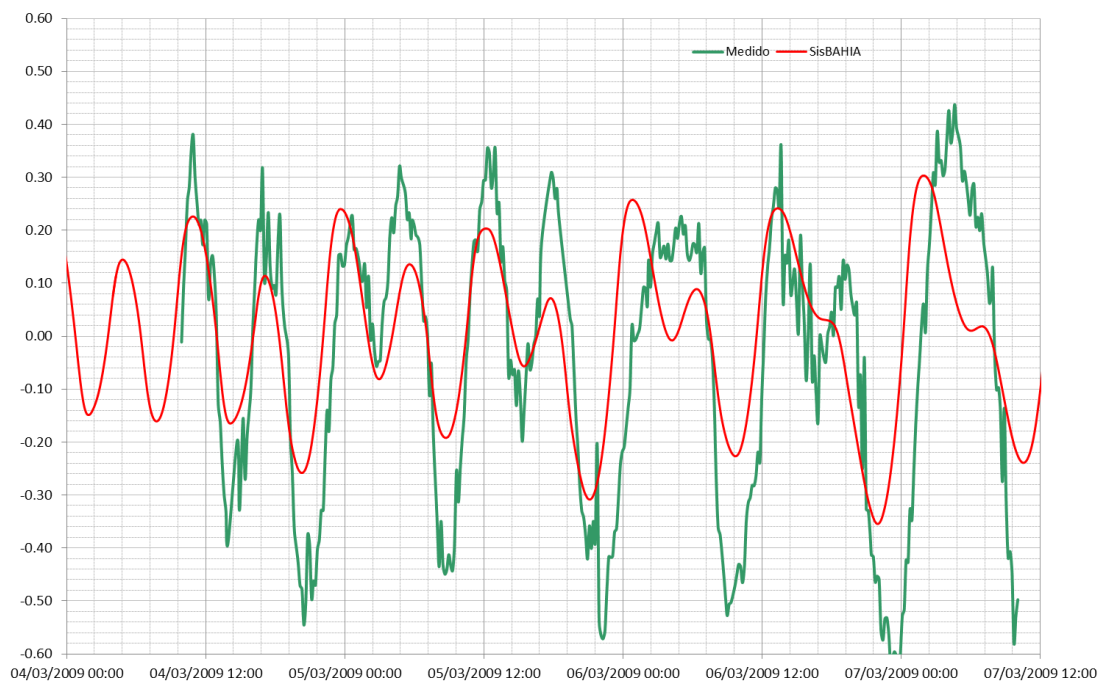


Figura 33 – Componente da velocidade (m/s) Leste-Oeste obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_C), no período de quadratura.

Na Figura 34 apresenta a comparação da componente da velocidade Leste-Oeste obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_C), no período de sizígia. Como no período de quadratura, o período de sizígia apresentou boa concordância de fases em relação à componente Leste-Oeste, com diferenças de amplitude.

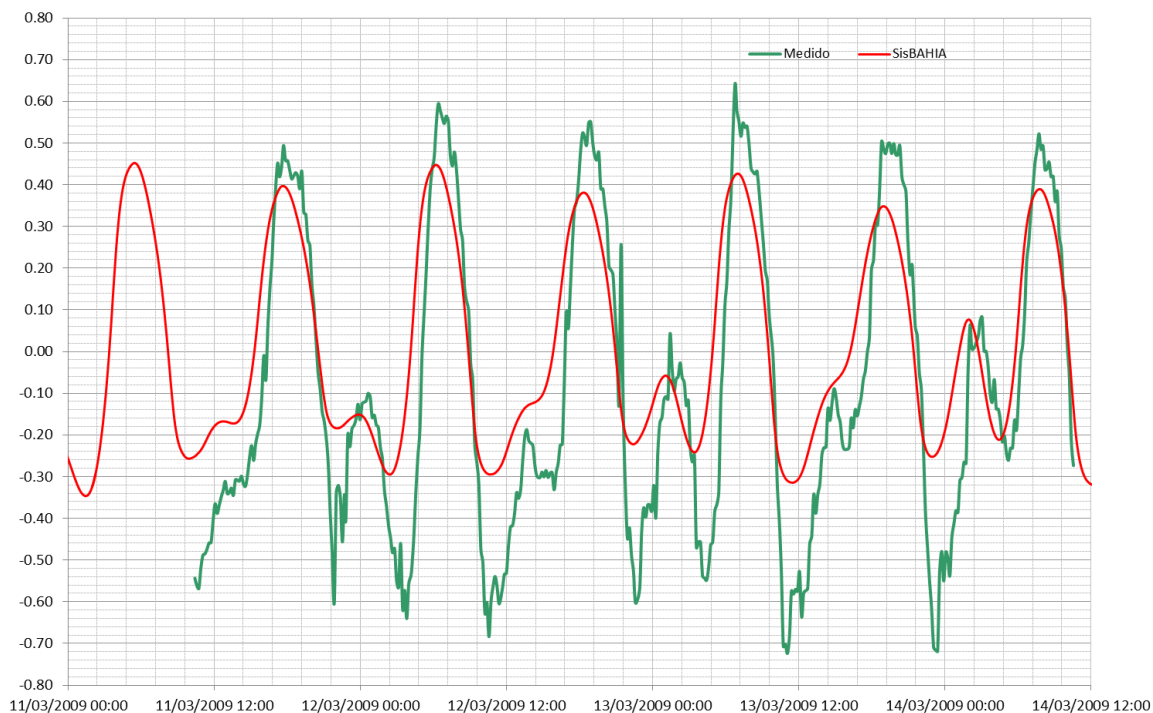


Figura 34 – Componente da velocidade (m/s) Leste-Oeste obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos (Est\_C), no período de sizígia.

Para a validação do modelo hidrodinâmico, os parâmetros utilizados para calibrar o modelo foram mantidos e foram realizadas comparações entre os valores da posição da superfície livre, obtidos com o SisBaHiA<sup>®</sup>, e os valores medidos em campo, entre os dias 10/07/2011 e 20/07/2011. Os resultados obtidos pelo SisBaHiA<sup>®</sup> apresentaram boa concordância em relação à fase e amplitude (Figuras 35 e 36). Os módulos das diferenças entre os valores da posição da superfície livre obtidos pelo modelo e os dados medidos podem ser observadas nas Figuras 37 e 38. As maiores diferenças ocorreram na preamar e na baixa-mar, a média do erro na região próxima ao Porto da Ponta do Félix foi de 8,5% e, próximo ao Porto de Paranaguá, foi de 7%. Apesar das variações, o erro se apresentou próximo dos valores indicados como satisfatório, que é de 5%.



Figura 35 – Comparação da posição da superfície livre obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos, próximo ao Porto da Ponta do Félix.



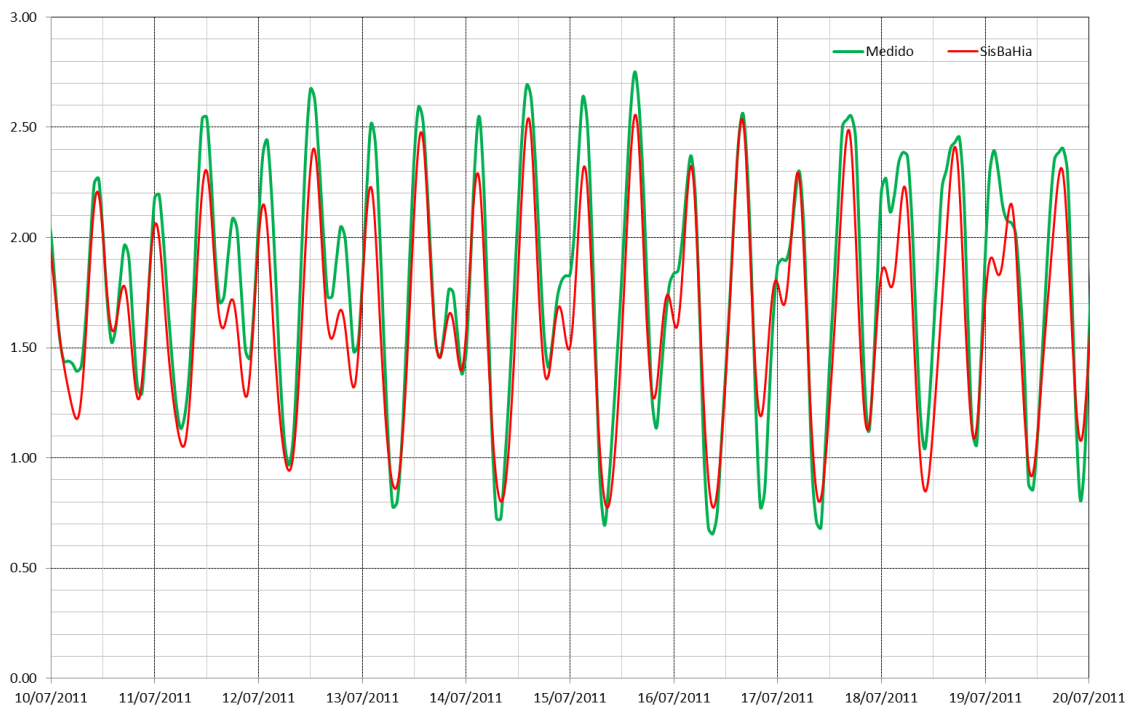


Figura 36 – Comparação da posição da superfície livre obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos, próximo ao Porto de Paranaguá.

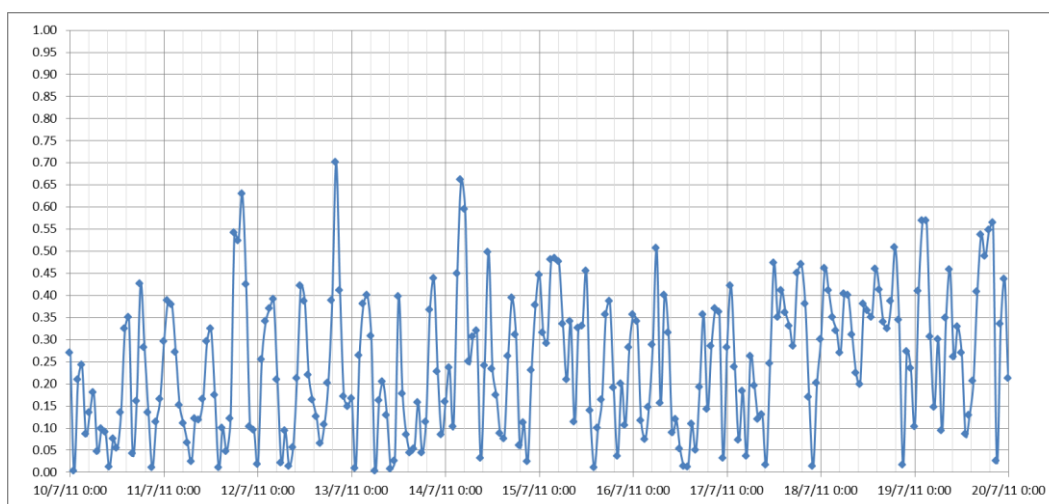


Figura 37 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos próximo ao Porto da Ponta do Félix.

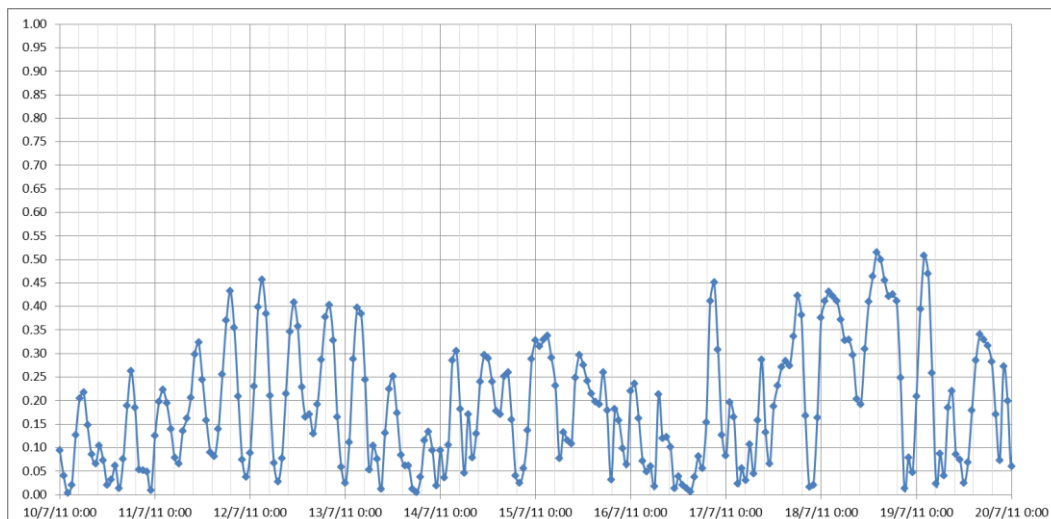


Figura 38 – Módulo da diferença da posição da superfície livre, em metros, obtida pelo SisBAHIA<sup>®</sup> e os dados medidos próximo ao Porto de Paranaguá.

Após a calibração e a validação do modelo, é possível afirmar que a circulação hidrodinâmica bidimensional do CEP está adequadamente definida e pode ser utilizada em modelos de transporte, considerando que o transporte de qualquer substância é fortemente dependente do padrão de circulação.

#### 4.3 Etapa 3: aplicação do modelo de transporte euleriano

A simulação do transporte de sedimentos no Complexo Estuarino de Paranaguá foi realizada primeiramente considerando apenas o material particulado em suspensão. Foram realizadas simulações com a velocidade de sedimentação constante, de 0,5 mm/s, e variável.

Com o intuito de verificar os locais onde os sedimentos oriundos dos rios tendem a se depositar, utilizou-se um valor de tensão crítica de mobilidade de 10 N/m<sup>2</sup> para que não se considerasse o movimento por arraste do sedimento de fundo. Ou seja, com isso é possível identificar apenas os locais onde o MPS tende a depositar.

A Figura 39 mostra a comparação da variação batimétrica dos resultados obtidos nas diferentes velocidades após 1 ano, 10 anos, 20 anos e 30 anos de simulação. Os valores negativos indicam locais de deposição.

Notaram-se mudanças batimétricas de quase todo o CEP; nas desembocaduras dos rios houve uma deposição de aproximadamente 6 metros, o canal de acesso aos portos teve uma deposição de cerca de 0,3 centímetros, após 30 anos. Os resultados alcançados para as diferentes velocidades de

deposição foram muito próximos, comprovando que a velocidade de sedimentação do CEP pode ser considerada igual 0,5 mm/s, como indicaram Mayerle et al. (2015).

Pode-se observar que após 30 anos, os sedimentos oriundos dos rios não sedimentam na região costeira adjacente, ficando retido dentro do Complexo Estuarino de Paranaguá. Os sedimentos dos rios Guaraqueçaba e Tagaçaba ficam retidos na baía das Laranjeiras e o MPS, provenientes dos rios Cachoeira, Faisqueira, Nhundiaquara, Sagrado e Nunes, ficam retidos na baía de Paranaguá, não ultrapassando a região de máxima turbidez, localizado próximo ao porto de Paranaguá.

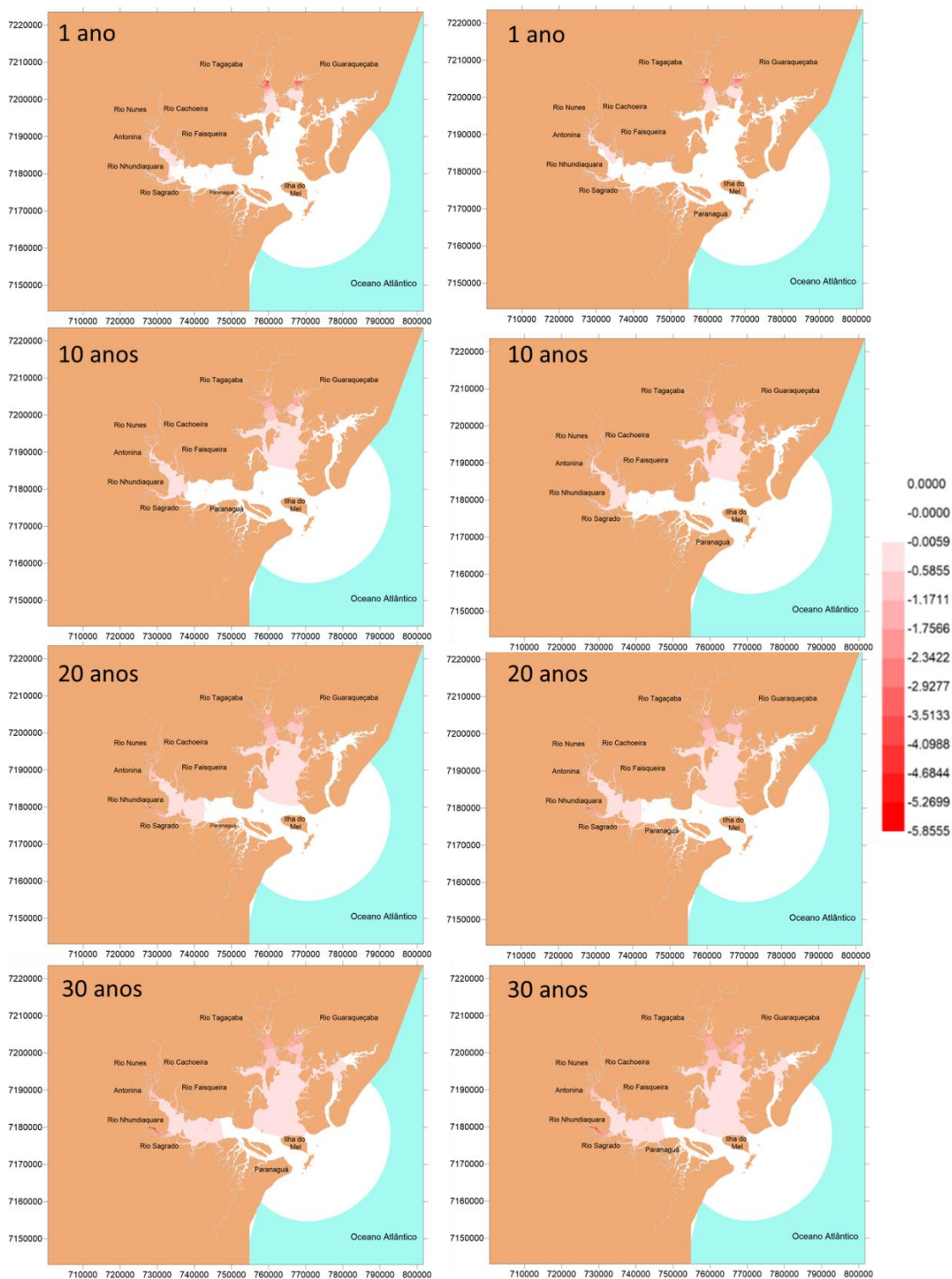


Figura 39 – Comparação da variação da batimetria, em metros, com velocidade de sedimentação variável (esquerda) e velocidade de sedimentação constante de 0,5 mm/s (direita) após 1 ano, 10 anos, 20 anos e 30 anos de simulação (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).

Nas Figuras 41 e 42 é possível observar a variação das alterações batimétricas em diferentes locais do CEP (Figura 42), para as duas velocidades de sedimentação, do início (2009) até o final da simulação (2039). Pode-se

observar que após 30 anos sedimentam-se em torno de 65,0 cm na região próximo a Antonina, 35,0 cm na região de Ponta do Félix, na Baía de Laranjeiras 20,0 cm, e nas demais regiões praticamente não houve deposição de sedimento, com valores menores que 2,0 cm.

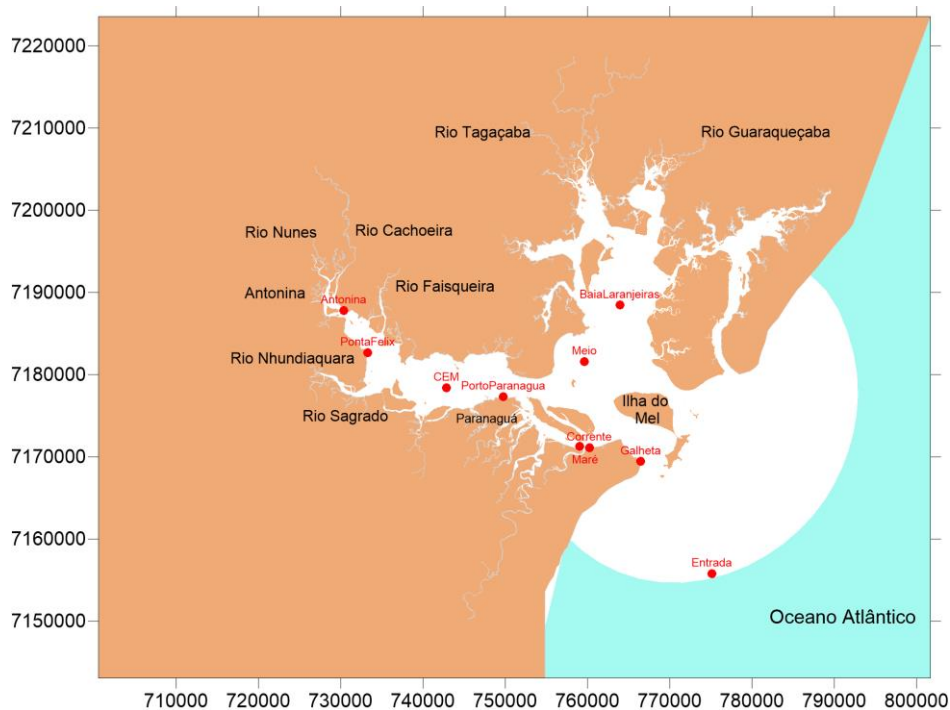


Figura 40 – Localização das estações dos locais da variação da batimetria e concentração.

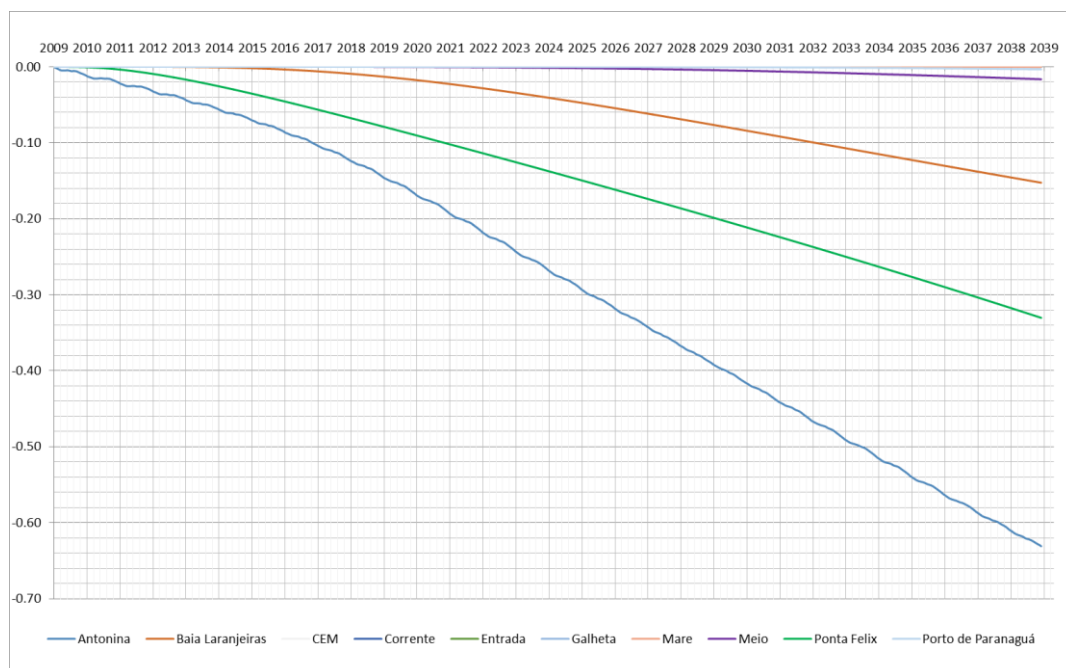


Figura 41 – Variação da batimetria, em metros, após 30 anos de simulação, com velocidade de sedimentação variável (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).

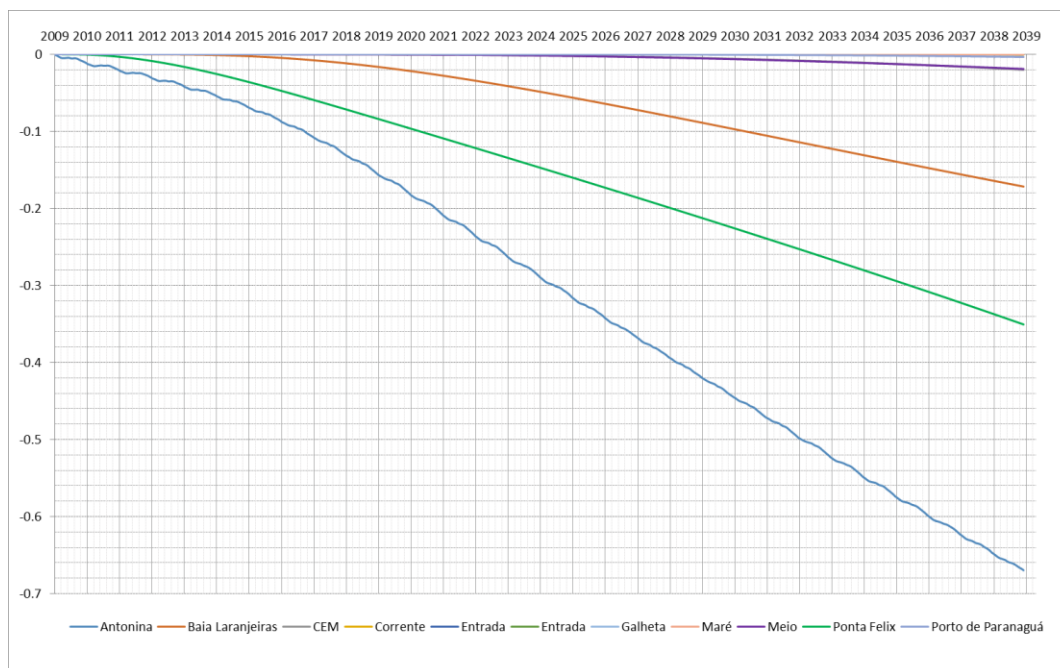


Figura 42 – Variação da batimetria, em metros, após 30 anos de simulação com velocidade de sedimentação constante de 0,5 mm/s (valores negativos apresentam deposição e os valores positivos, erosão).

As diferenças entre as variações batimétricas obtidas com velocidade de sedimentação constante e variável podem ser observadas na Figura 43; ressalta-se que a maior diferença ocorre na estação Antonina, com valores atingindo 4,0 cm. A região da Ponta do Félix e a baía das Laranjeiras apresentaram valores próximos, em torno de 2,0 cm; as outras estações praticamente não apresentaram diferenças, comprovando que a velocidade de sedimentação do CEP pode ser admitida como constante e igual a 0,5 mm/s.

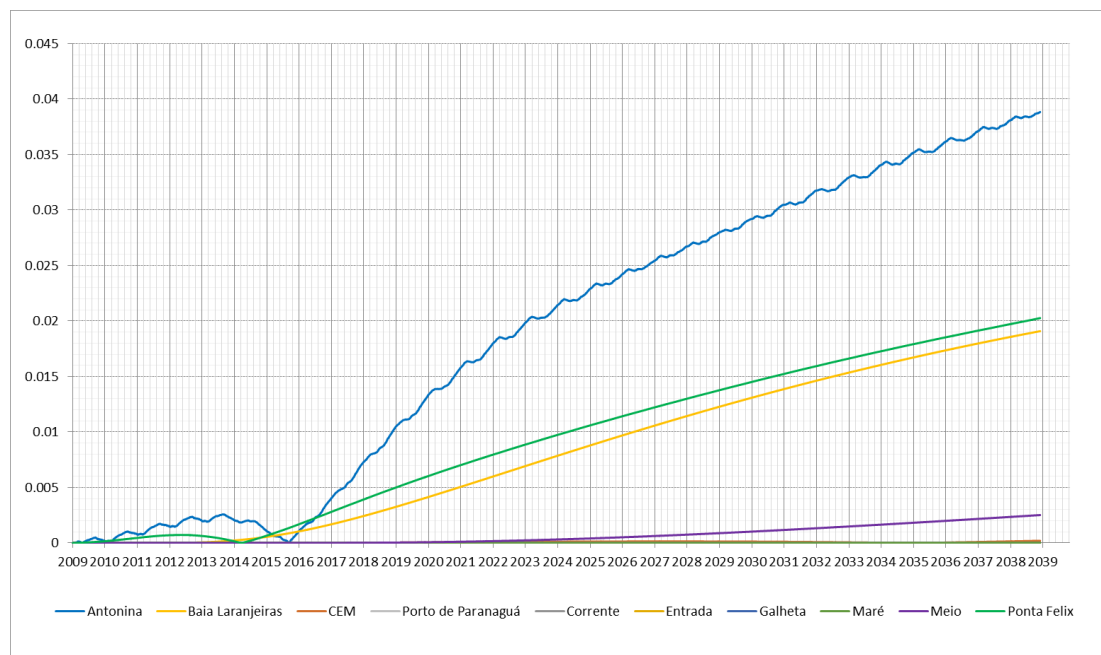


Figura 43 – Diferença da variação da batimetria, em metros, com velocidade de sedimentação constante e variável.

É possível ainda obter a concentração do material particulado em suspensão no domínio de modelagem, ao final dos 30 anos de simulação. Como condição inicial, a concentração do material particulado em suspensão foi considerada nula em todo o complexo estuarino de Paranaguá. São mostrados somente os resultados obtidos para a velocidade de sedimentação constante, pois os resultados apresentaram valores semelhantes. (Figuras 44 e 45). As maiores concentrações encontradas estão próximas às desembocaduras dos rios, considerando que estas são as únicas fontes de entrada do material particulado. Mesmo após 30 anos, os sedimentos ainda se concentram nas regiões próximas aos rios, demonstrando que o MPS não apresenta valor expressivo de concentração nas regiões do domínio distante das desembocaduras dos rios.

Na Figura 46 é possível observar os valores de concentração em diferentes locais do CEP (Figura 40), do início (2009) até o final da simulação (2039). Nota-se que a única estação que apresenta valores significativos de concentração é a Antonina, localizada próxima a desembocadura dos rios Nunes e Cachoeira, as demais estações apresentando valores próximos a zero.



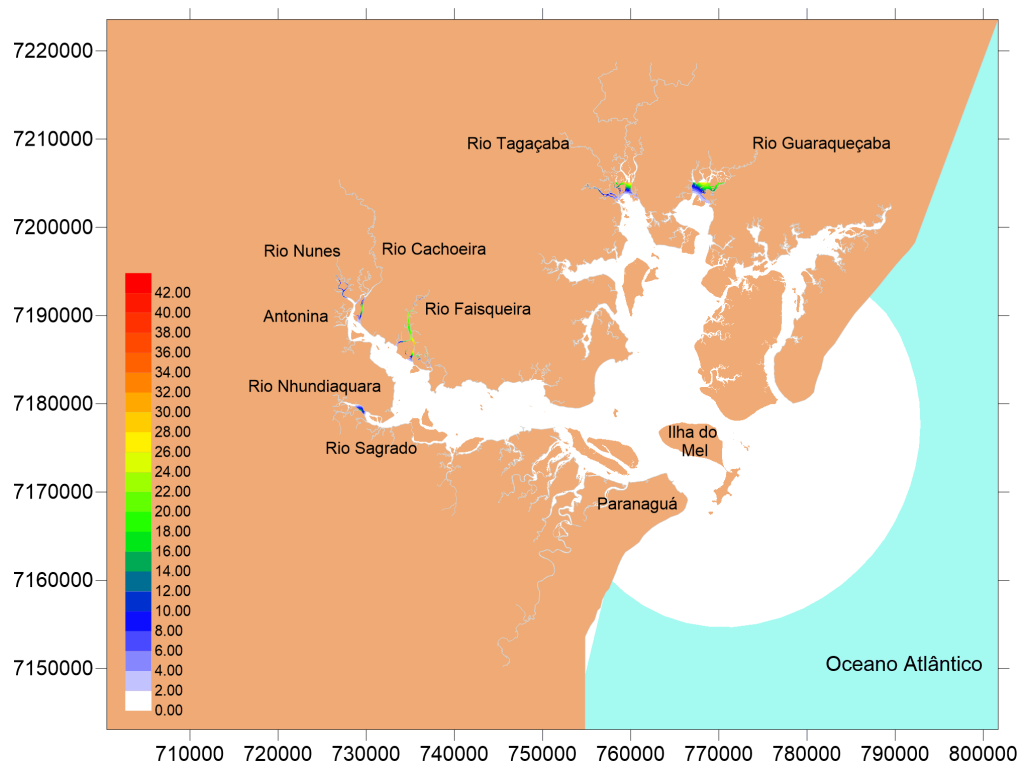


Figura 44 – Distribuição de concentrações de material particulado em suspensão, em mg/L, ao final do primeiro ano.

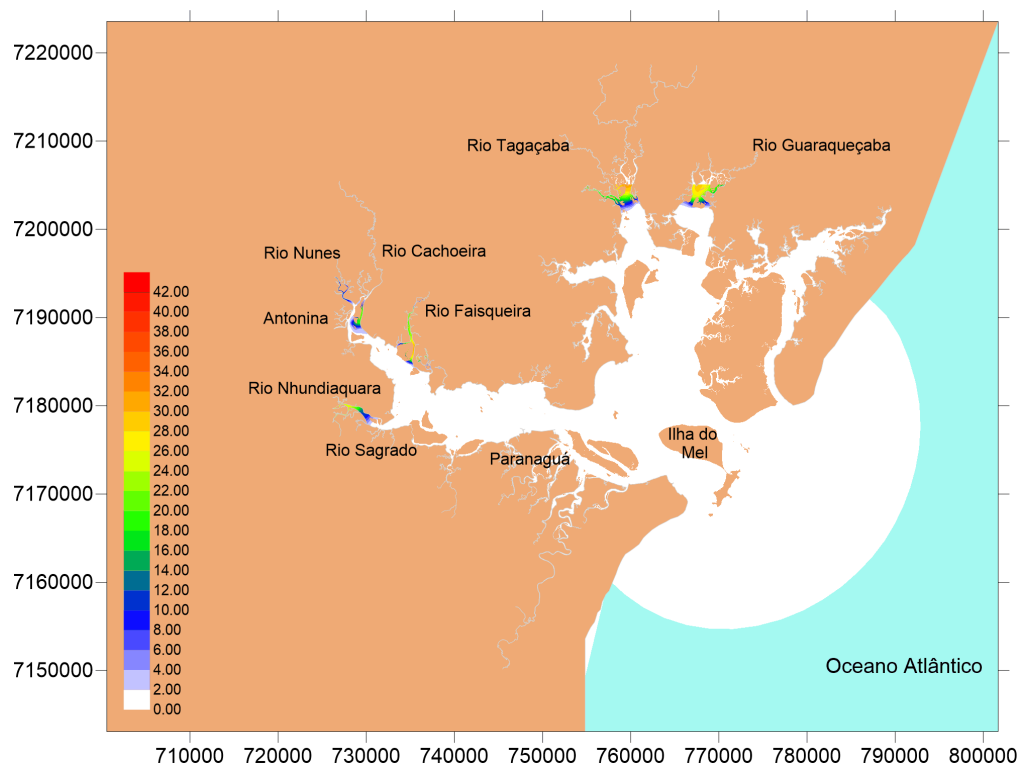


Figura 45 – Distribuição de concentrações de material particulado em suspensão, em mg/L, após 30 anos.



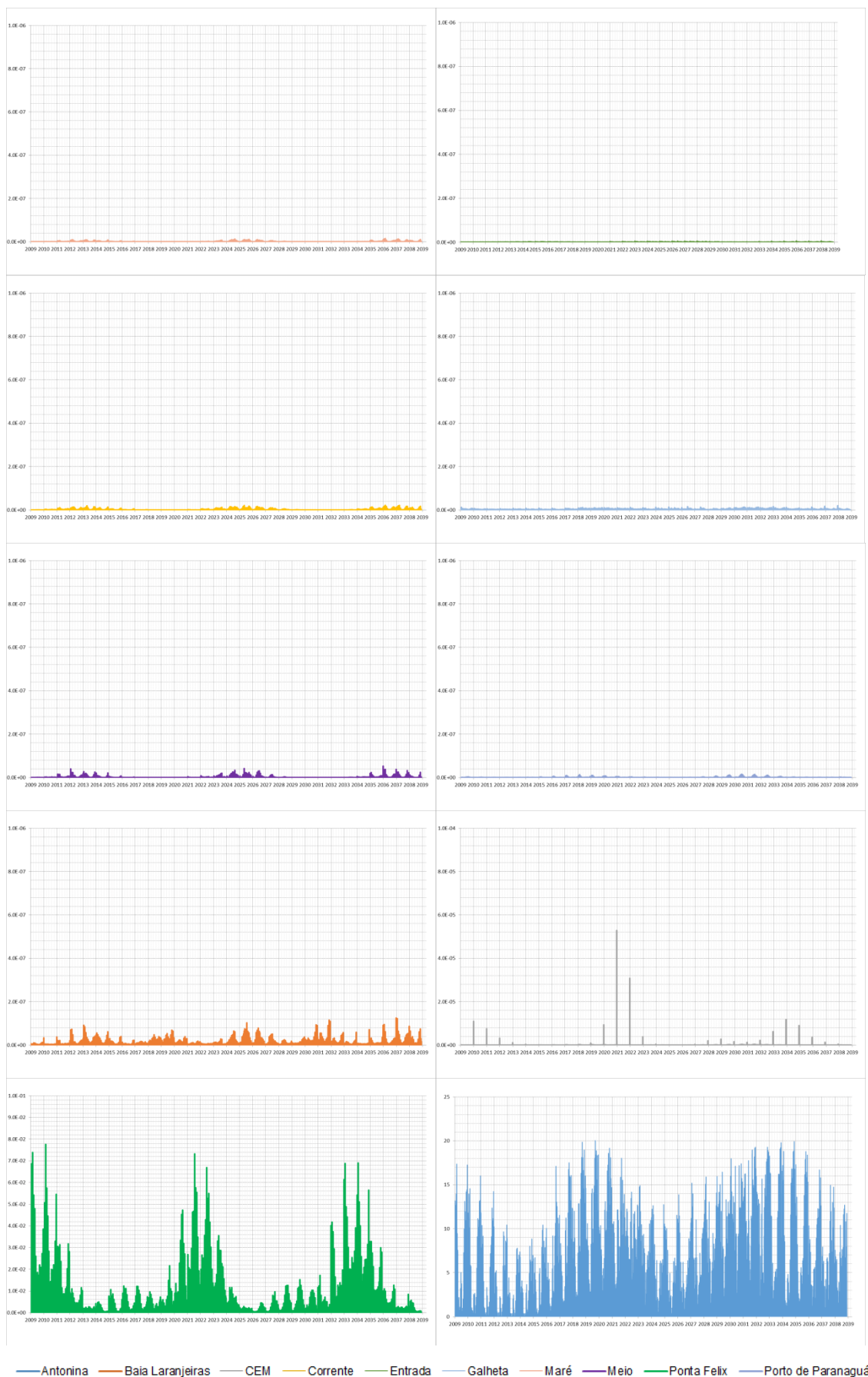


Figura 46 – Concentração de material particulado em suspensão, em mg/L, após 30 anos nas estações indicadas na Figura 40.

As Figuras 47, 48, 49 e 50 mostram o percentual de tempo em que a tensão do fundo fica acima do limite crítico para movimentar diferentes tipos de sedimentos, obtido durante o ano de 2009 pelo modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional. De forma geral, os canais presentes na parte do interior do CEP apresentam potencial de movimentação de sedimentos de fundo. As regiões próximas às fronteiras, onde as componentes de velocidades são baixas, apresentam baixo potencial de movimentação para os sedimentos.

O agrupamento formado pela areia muito fina e silte está presente principalmente nas baías de Antonina e Paranaguá e próximo as embocaduras dos rios Tagaçaba e Guaraqueçaba. Nas baías de Antonina e Paranaguá, o percentual de tempo em que a tensão de fundo é maior que a tensão crítica de mobilidade é de aproximadamente 30% do tempo de simulação (um ano); próximo às embocaduras dos rios Tagaçaba e Guaraqueçaba, praticamente não há capacidade de movimentação, com apenas 15% do tempo de simulação podendo ocorrer a tensão de fundo com potencial de movimentação. A areia muito fina e o silte, presentes nestas regiões, possivelmente têm origem nos rios afluentes ao CEP, que trazem este tipo de sedimento. Nas porções mais externas do CEP, não é detectado a presença deste tipo de sedimento, que possivelmente deposita-se na zona de máxima turbidez (CUNHA et al., 2015) (Figura 47).

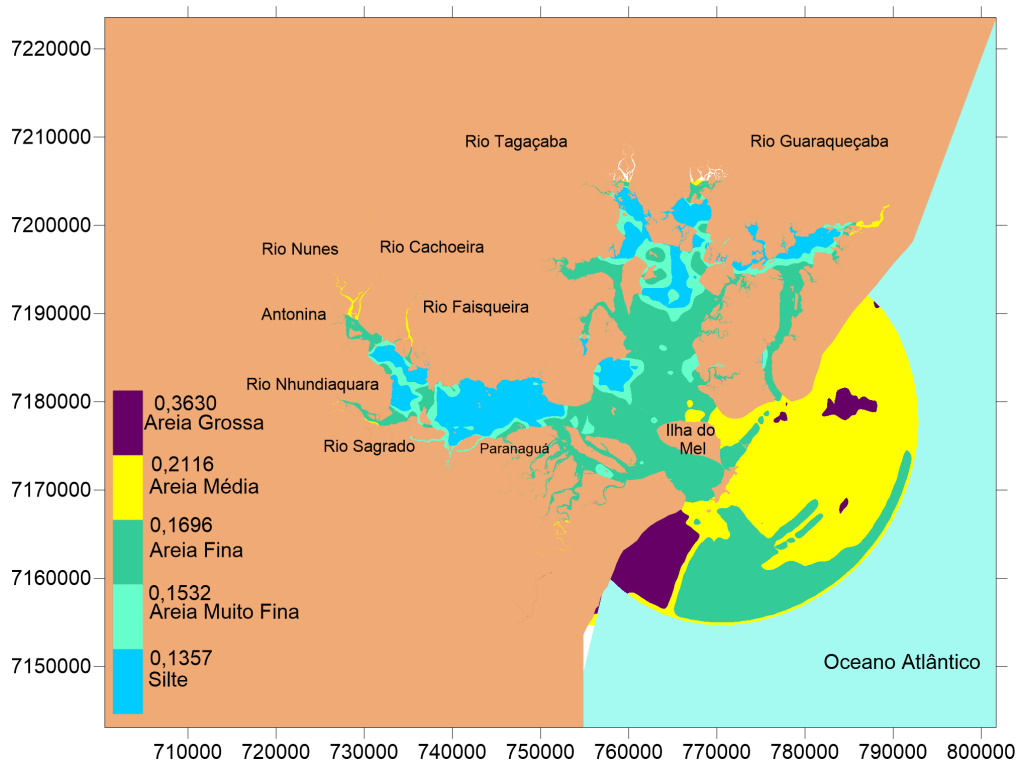


Figura 12 – Caracterização das regiões a partir do tipo de sedimento com limite de tensão crítica de mobilidade ( $N/m^2$ ) no Complexo Estuarino de Paranaguá.

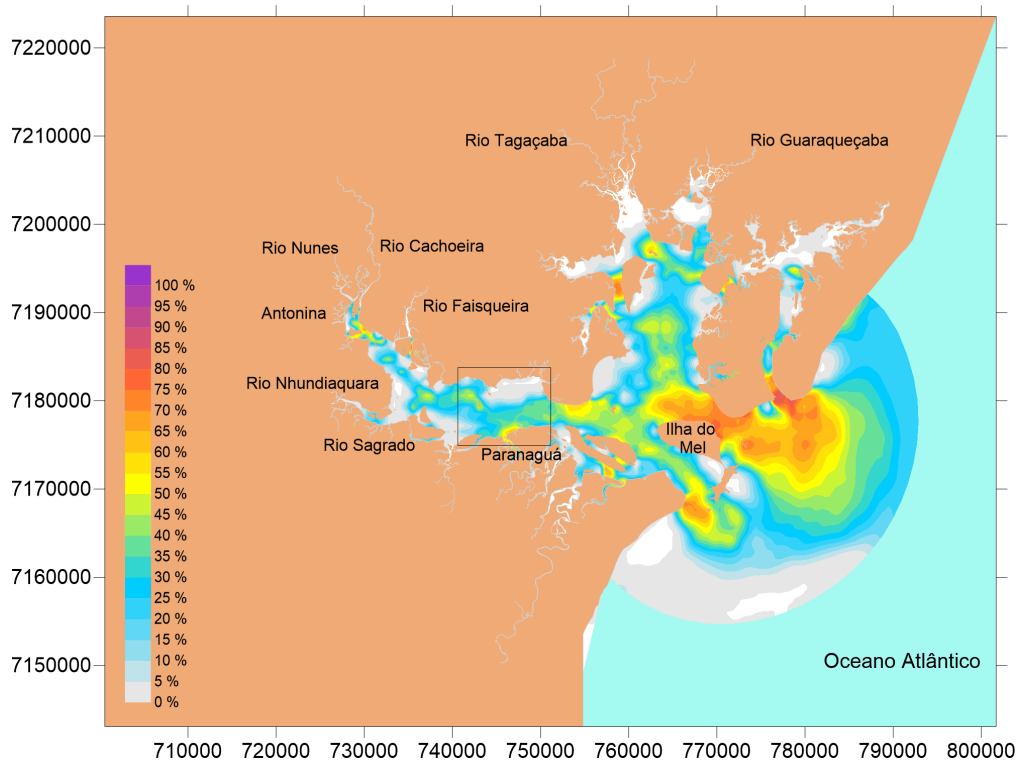


Figura 47 – Persistência da tensão de fundo  $> 0,1532 N/m^2$ , valor capaz de movimentar areia muito fina e silte, com destaque para a zona de máxima turbidez.

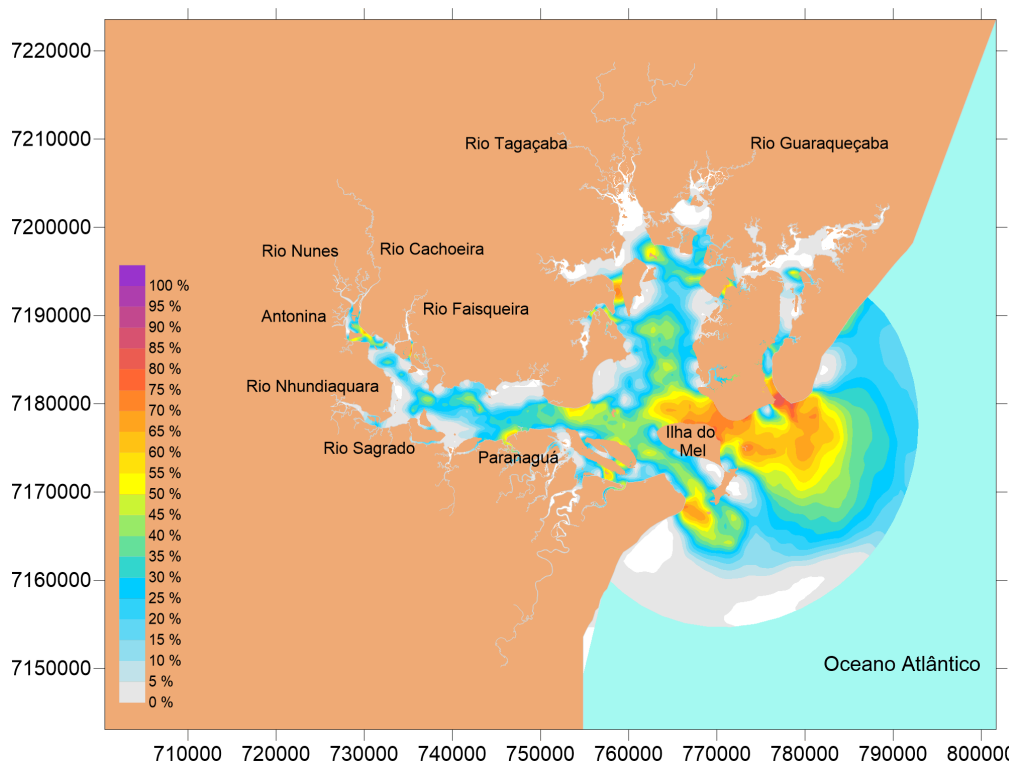


Figura 48 – Persistência da tensão de fundo  $> 0,1696 \text{ N/m}^2$ , valor capaz de movimentar areia fina.

As regiões próximas ao canal da Galheta e na baía das Laranjeiras predominam a areia fina e considerando a tensão crítica de mobilidade para este sedimento, esta região apresenta entre 25 e 50% de probabilidade de erosão. Já ao norte da Ilha do Mel, a possibilidade de movimentar esse sedimento fica entre 60 e 75%. Observa-se ainda que, no canal de acesso ao porto de Paranaguá, a possibilidade de erosão aumenta, chegando a atingir 60% do tempo de simulação.

Na embocadura norte do CEP que apresenta areia média como principal sedimento de fundo é possível observar que em aproximadamente 60% do tempo deve ocorrer erosão, com tensões de fundo maiores que as tensões críticas de mobilidade para areia média. Nas embocaduras dos rios Nunes, Cachoeira e Faisqueira, que também apresentam areia média, praticamente não apresenta probabilidade de movimentação deste sedimento. A possibilidade de movimentação da grande porção da areia média e a areia grossa localizada fora do CEP, na região costeira adjacente, não foi analisada neste trabalho, por possuir influência importante das ações das ondas que não foram consideradas na caracterização da circulação hidrodinâmica.

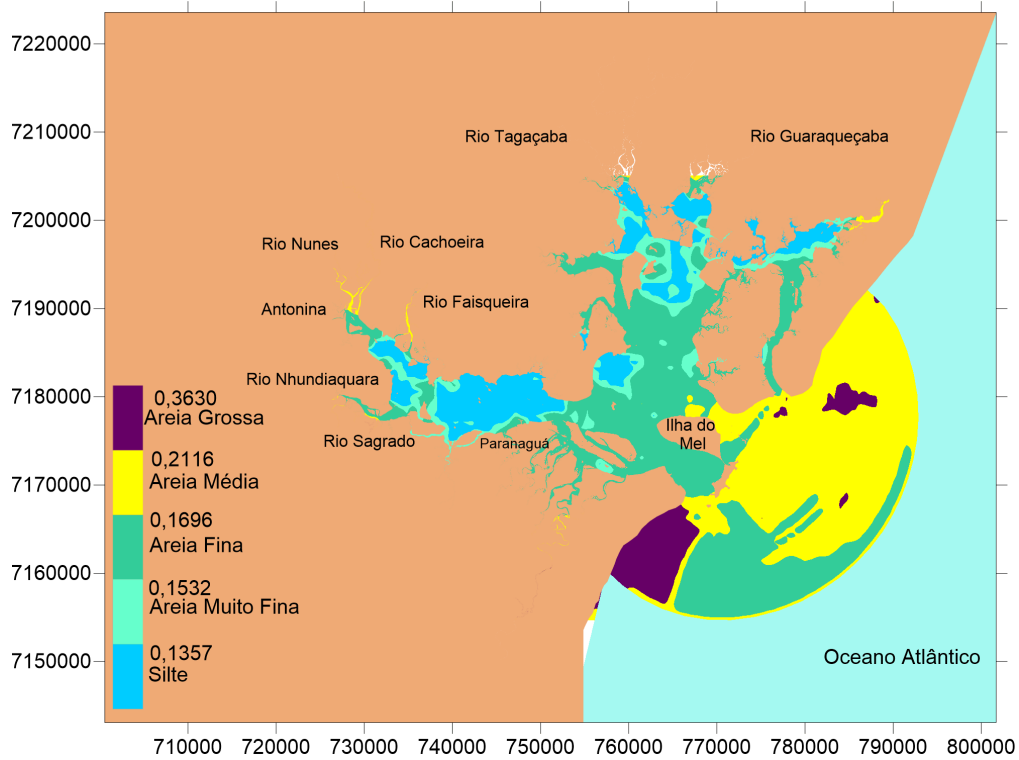


Figura 12 – Caracterização das regiões a partir do tipo de sedimento com limite de tensão crítica de mobilidade ( $N/m^2$ ) no Complexo Estuarino de Paranaguá.

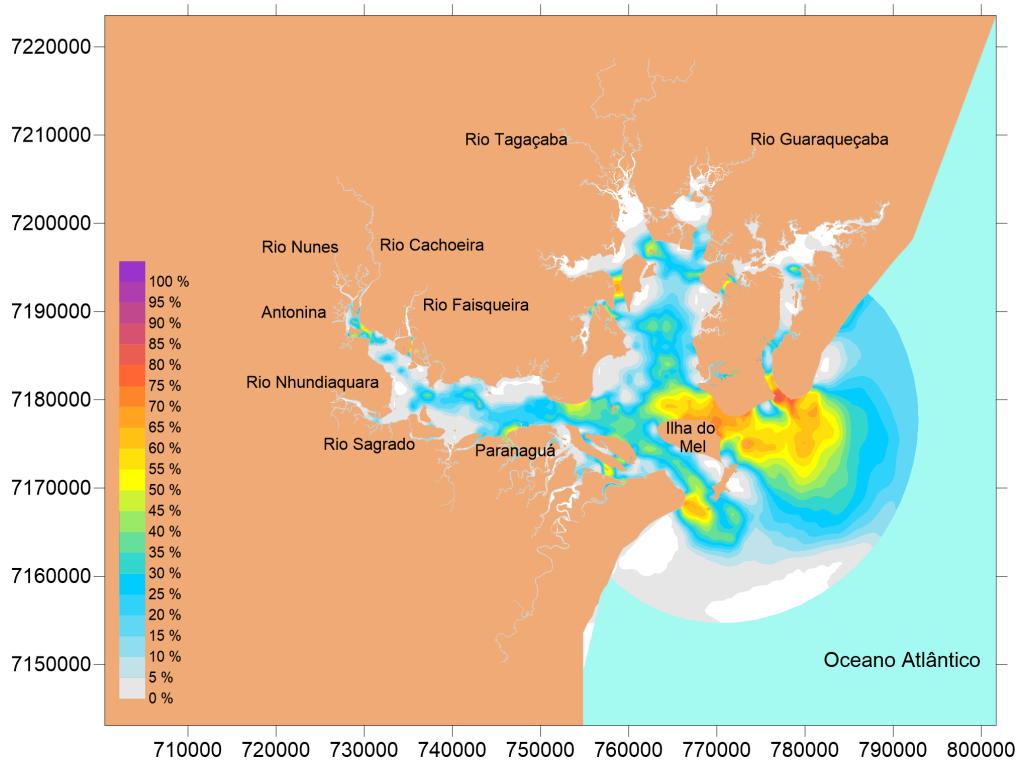


Figura 49 – Persistência da tensão de fundo  $> 0,2116 N/m^2$ , valor capaz de movimentar areia média.

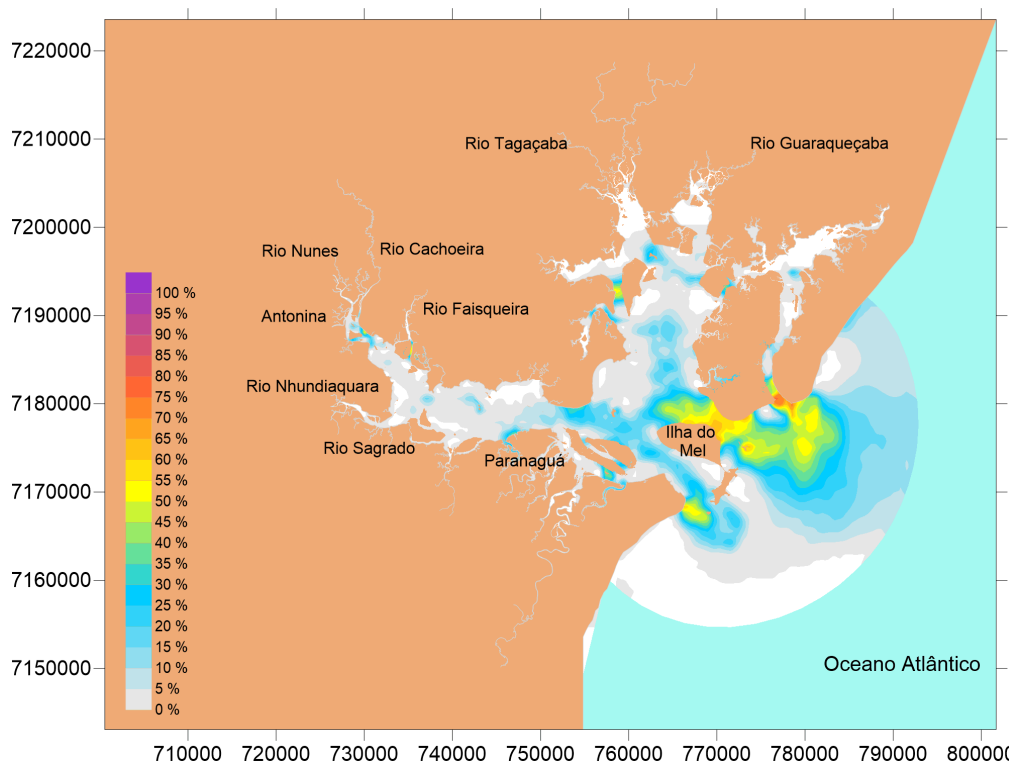


Figura 50 – Persistência da tensão de fundo  $> 0,363 \text{ N/m}^2$ , valor capaz de movimentar areia grossa.

Os resultados obtidos para as simulações do transporte de sedimentos com a influência da vazão sólida dos rios juntamente com a movimentação do sedimento do fundo e somente com movimentação do sedimento de fundo, usando a formulação de Van Rijn, são apresentados para a região do canal da Galheta, local de interesse do presente trabalho. Neste sentido, foram definidas cinco estações ao longo da região do canal da Galheta, como indicado na Figura 21. Para os mesmos cenários, com e sem vazão sólida, foram realizadas simulações com a formulação de Meyer-Peter e Muller (1948) (MPM), com o intuito de verificar o comportamento da formulação de Van Rijn (1984) (VR) quando comparada com outras formulações.

Nas Figuras 51, 52, 53, 54 e 55 podem ser observados os valores das variações batimétricas e das tensões de fundo (TF). Os valores acumulados da variação batimétrica foram muito baixos para todas as estações. As estações CG\_1, CG\_2 e CG\_4 apresentaram comportamentos bastante semelhantes com as duas formulações, com oscilações de movimentação e sedimentação demonstrando ciclos de erosão e deposição em acordo com as variações das tensões de fundo, responsáveis pela capacidade de mover o sedimento de

fundo, ou seja, quando ocorre o pico da tensão, o sedimento depositado começa a erodir, e quando essa tensão diminui, o material tende a ficar parado.

Na estação CG\_3 há um maior acúmulo do sedimento, na metade da simulação ocorre o processo de estabilização da sedimentação e inicia o ciclo constante de erosão e deposição. Os resultados com a fórmula de Meyer-Peter e Muller apresentaram maior taxa de deposição em relação a formulação de van Rijn, com comportamentos semelhantes. Já na estação CG\_5 obteve-se certa diferença, no entanto as duas formulações representam comportamentos muito semelhantes nos resultados nas duas formulações, a formulação de Van Rijn não apresentou valores significativos da variação batimétrica, e na Meyer-Peter e Muller ocorrem os ciclos de erosão e deposição. Esta estação está localizada próxima a zona de máxima turbidez e apresentou uma significativa diferença nas simulações com a influência da vazão sólida dos rios, indicando uma possível contribuição do sedimento oriundo dos rios afluentes.

De maneira geral pode-se observar que os resultados das simulações com a vazão sólida dos rios junto com a movimentação do sedimento do fundo, e somente com a movimentação do sedimento do fundo sem a vazão sólida dos rios não apresentaram diferenças significativas, indicando que o canal de acesso aos portos do CEP praticamente não recebe a influência dos sedimentos oriundos dos rios. Porém, nas regiões mais internas, mais especificamente próximas a estação CG\_5, verificou-se que há uma pequena interferência desses sedimentos.

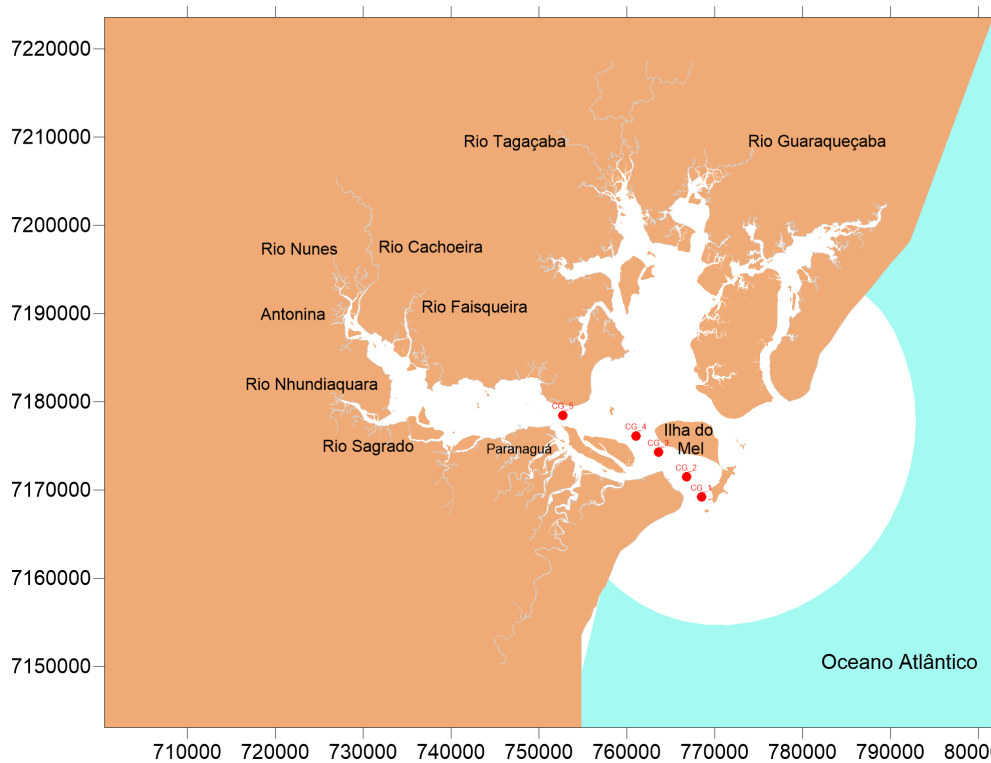


Figura 21– Localização das estações no canal da Galheta para observação dos processos de sedimentação e/ou erosão.

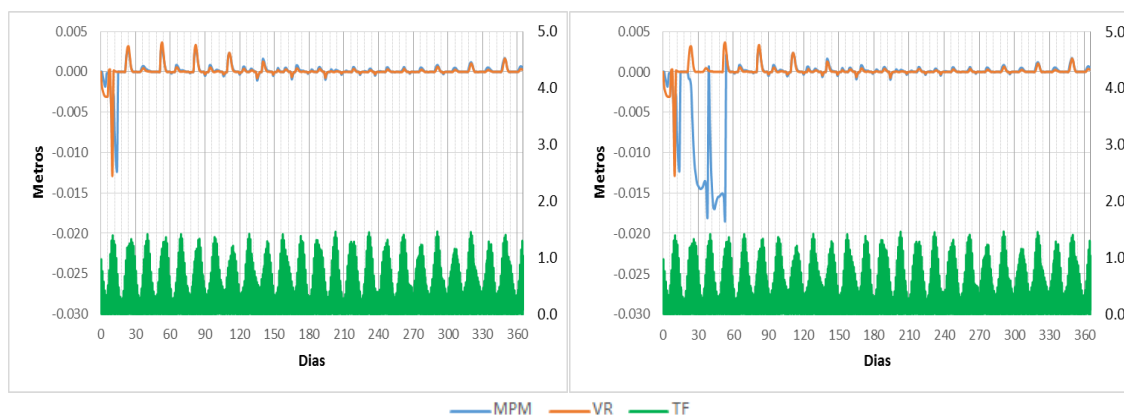


Figura 51 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em  $N/m^2$ , na estação CG\_1 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).



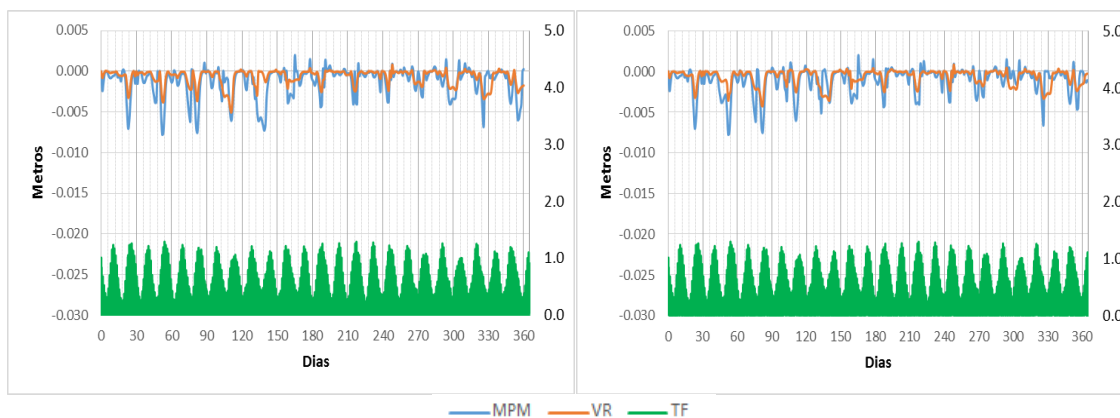


Figura 52 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em  $N/m^2$ , na estação CG\_2 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).

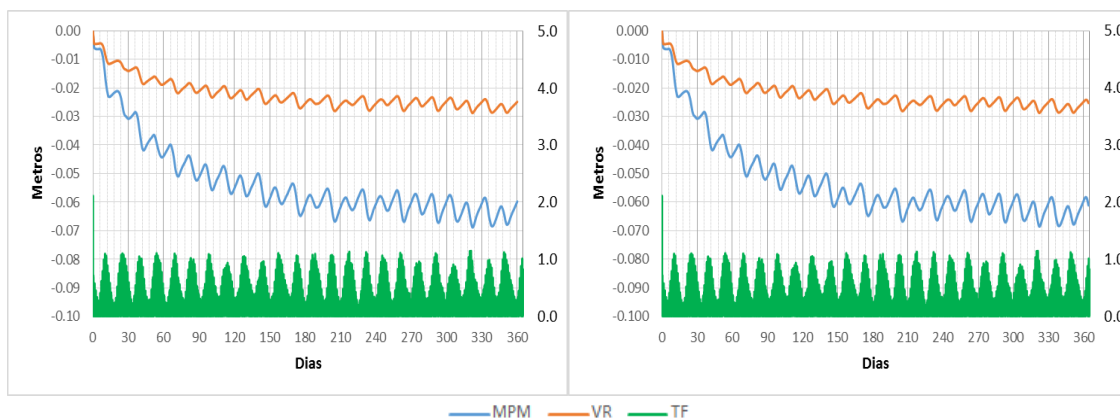


Figura 53 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em  $N/m^2$ , na estação CG\_3 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).

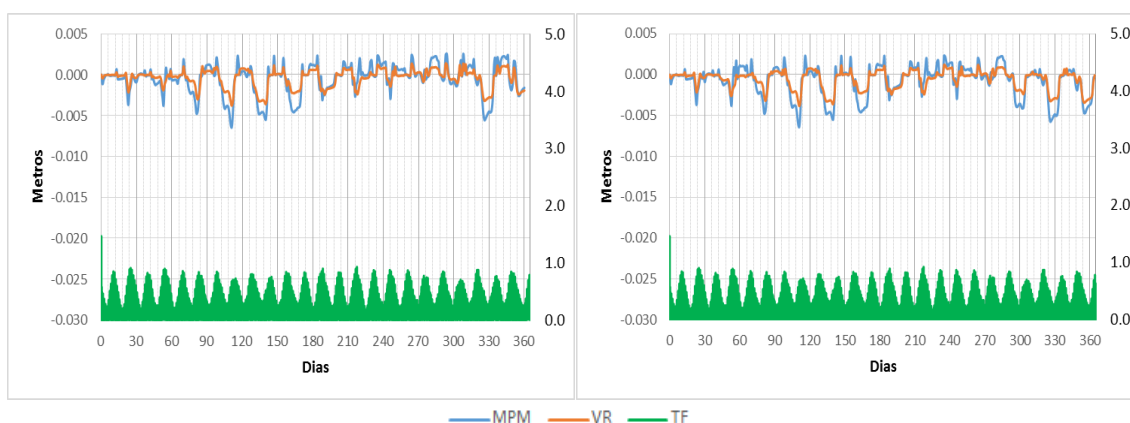


Figura 54 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em  $N/m^2$ , na estação CG\_4 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).

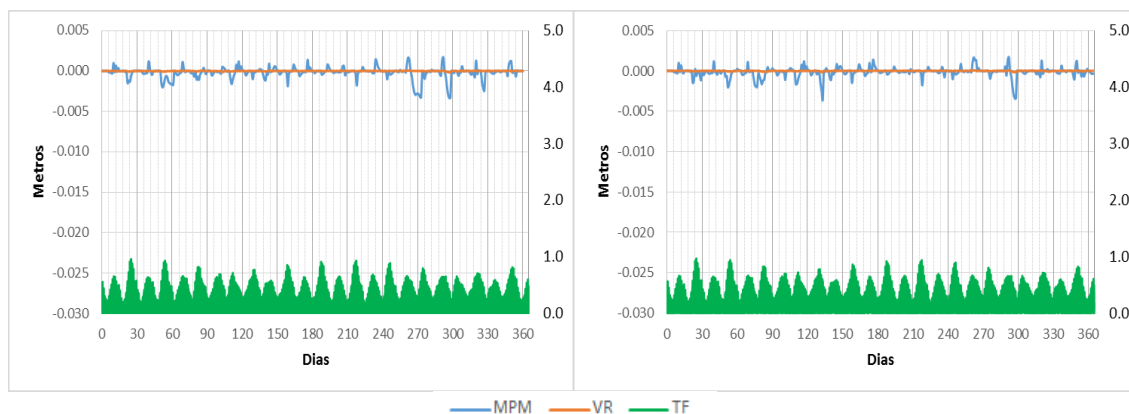


Figura 55 – Valores acumulados da variação batimétrica (eixo esquerdo), em metros, e da tensão do fundo (eixo direito), em  $N/m^2$ , na estação CG\_5 do canal da Galheta, com a vazão sólida dos rios e a movimentação do sedimento do fundo (esquerda) e somente com a movimentação do material do fundo (direita) (valores negativos apresentam a deposição e os valores positivos a erosão).

A Figura 56 mostra a variação batimétrica do Complexo Estuarino de Paranaguá ao final de 30 anos de simulação, com a contribuição da vazão sólida dos rios juntamente com a movimentação do material do fundo e usando a formulação de Van Rijn (1984). Os valores positivos (cor azul) significam erosão e os valores negativos (cor verde), deposição. Como o interesse do trabalho é a região do canal de acesso aos portos do CEP, somente são analisados os resultados na região do canal da Galheta. De maneira geral destaca-se que a região apresenta uma predominância de sedimentação.

Observando a Figura 56 é possível verificar que a região do canal da Galheta apresenta apenas dois locais com possibilidade de erosão e na região próxima a ilha do Mel não há movimentação significativa de sedimento. Nas áreas mais internas da baía, a sedimentação é predominante e na área próxima a região costeira, é possível observar áreas com possibilidade de erosão. Os valores máximos encontrados de mudança batimétrica no canal da Galheta foram de até 0,75 metros, para a sedimentação, e 0,25 metros, para erosão. Mayerle et al. (2015) apresentaram medições batimétricas realizadas no canal de navegação na região da Galheta, entre o ano de 2005 e 2006, com acúmulo médio no leito de aproximadamente 0,75 m na região próxima a estação CG\_5, 0,55 m na região próxima a estação CG\_04 e 0,10 m na região próxima a estação CG\_1. É importante observar que tais medições foram realizadas no canal de navegação; a modelagem realizada neste trabalho

apresenta uma escala espacial diferente e, portanto, uma comparação detalhada não deve ser feita.

Os modelos, por constituírem-se em representações simplificadas da realidade, necessitam ser calibrados e validados, para que os coeficientes possam ser corretamente definidos. Sendo assim, os valores da variação batimétrica obtidos neste trabalho devem ser apreciados como uma indicação do comportamento da região, pois não foram consideradas outras fontes de sedimentos e principalmente, e, não foi possível calibrar e validar o modelo de transporte de sedimentos para o CEP. No entanto, os resultados permitem definir o local onde os sedimentos tendem a depositar e, ainda, que o canal de acesso aos portos recebe muito pouco sedimento oriundo dos rios. Assim, esta modelagem permite concluir que grande parte dos sedimentos depositados no canal de acesso aos portos do CEP não têm como origem os rios, ou seja, o assoreamento deve ser ocasionado principalmente pela movimentação dos sedimentos de fundo e dos processos de dragagem. Neste sentido, especial atenção deve ser dada ao local onde o material dragado, oriundos dos canais de acesso aos portos, chamado de área de bota-fora, está localizado.

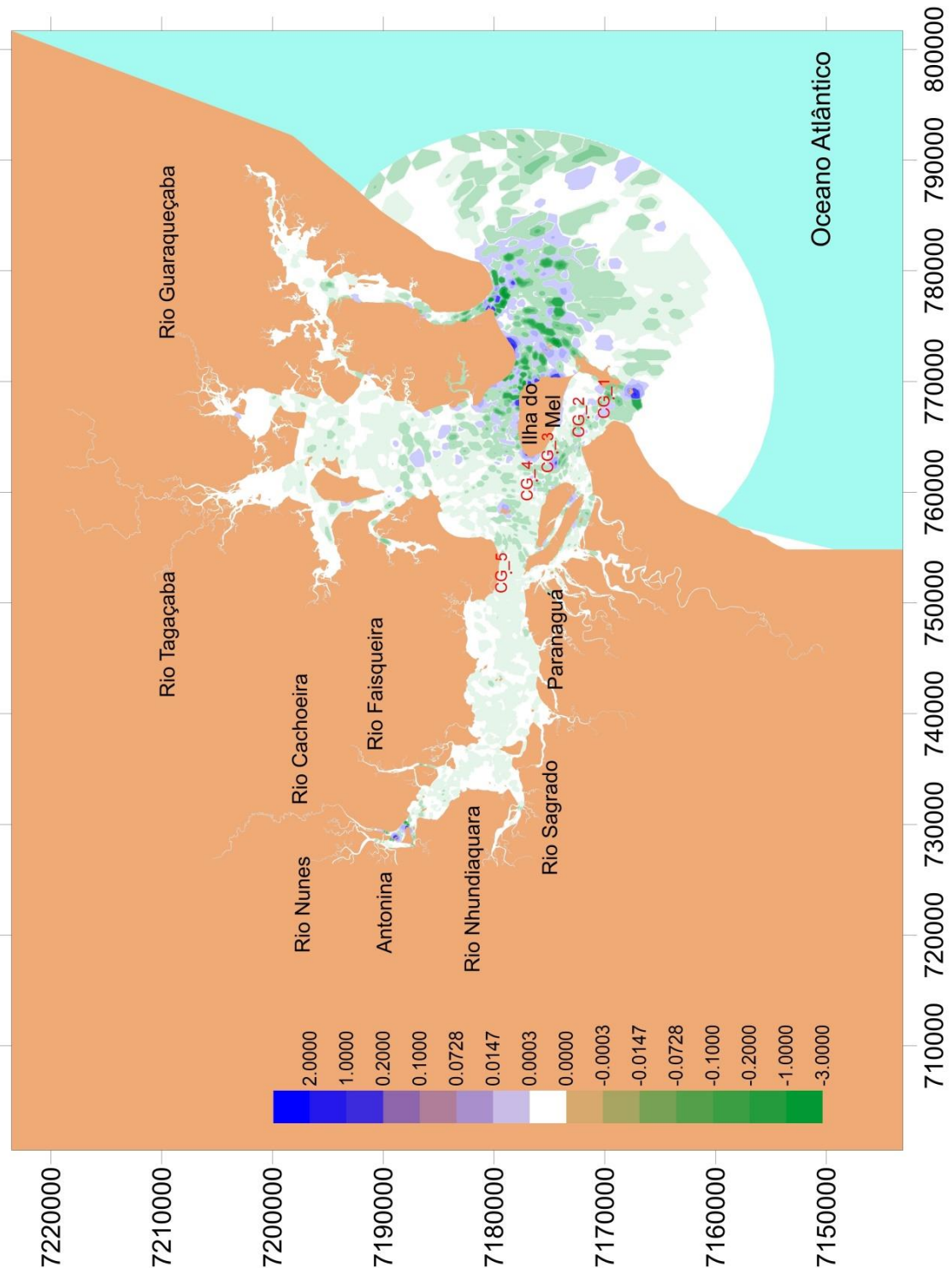


Figura 56 – Variação da batimetria, em metros, ao final de 30 anos de simulação no Complexo Estuarino de Paranaguá com a formulação de Van Rijn (1984), com a vazão sólida dos rios e a movimentação do material do fundo (valores negativos apresentam a deposição, e os valores positivos, erosão).

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi usado o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte euleriano do SisBAHIA<sup>®</sup> com o objetivo de avaliar o processo de erosão e sedimentação na região do canal de acesso aos portos do Complexo Estuarino de Paranaguá.

Os resultados da simulação hidrodinâmica, que é uma etapa essencial para o processo de modelagem do transporte euleriano, foram considerados bons, quando comparado com as medições realizadas em campo. Isto pode ser comprovado com o processo de calibração e validação do modelo hidrodinâmico desenvolvido neste trabalho.

Através dos resultados do modelo hidrodinâmico pode-se verificar que as componentes da maré sofrem uma amplificação das amplitudes à medida que entram para o interior da baía de Antonina. Os campos de velocidades apresentaram forte relação com a batimetria; áreas de estrangulamento geram uma intensificação das correntes.

O acoplamento dos modelos de circulação hidrodinâmica e o de transporte permitiu simular 30 anos do transporte de sedimentos verificando que o transporte de sedimentos está fortemente relacionado com o padrão de circulação hidrodinâmica. Nas simulações do transporte, primeiramente foi realizado o transporte somente com o material particulado em suspensão, com o intuito de verificar os locais onde os sedimentos oriundos dos rios tendem a se depositar. Esses sedimentos possivelmente depositam nas regiões próximas as desembocaduras dos rios; o canal de acesso aos portos praticamente não apresentou alteração.

Comparação entre as simulações considerando a influência dos sedimentos oriundos dos rios no Complexo Estuarino de Paranaguá e o potencial de movimentação do fundo, através da circulação hidrodinâmica, e utilizando somente a movimentação do fundo, ou seja, sem a vazão sólida dos rios, utilizando a formulação de Van Rijn (1984), foram realizadas e os resultados mostram que, na região do canal da Galheta, não apresentam diferenças significativas, portanto, concluindo que possivelmente os sedimentos oriundos dos rios não se depositam no canal da Galheta,

confirmando que o assoreamento possivelmente é ocasionado pela movimentação dos sedimentos do fundo.

Os valores da variação batimétrica, obtidos neste trabalho, foram menores que os observados na literatura e devem ser apreciados como uma indicação do comportamento da região, pois não foram consideradas outras fontes de sedimentos e principalmente, e, não foi possível calibrar e validar o modelo de transporte de sedimentos para o CEP. No entanto, é possível afirmar que o modelo indicou regiões de maiores taxas de sedimentação no canal e ainda, qual a origem do sedimento que contribui para o processo de sedimentação. Vale ressaltar que a modelagem matemática não é uma ciência exata, e sim uma ferramenta de apoio que pode ser utilizada para a gestão de recursos hídricos.

Para estudos futuros, sugere-se aplicar o modelo de circulação hidrodinâmica tridimensional, possibilitando assim, o cálculo das velocidades de atrito com maior confiabilidade que o modelo 2DH, que determina esta velocidade de valores médios na vertical. A velocidade de atrito é o parâmetro fundamental na determinação do parâmetro de Shields, usado para cálculo das vazões sólidas. A correta determinação da velocidade de atrito deve melhorar a acurácia do modelo de transporte de sedimentos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, R. J. *Geologia da planície costeira do Estado do Paraná*. Tese de Doutorado em Geologia Sedimentar - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

ANTUNES, A. F. B.; RODRIGUES, F. Análise Sinóptica da Sedimentação da Baía de Paranaguá-PR por Meio de Processamento digital de imagens livre: Um Exercício prático. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. *Anais...* Foz do Iguaçu, PR. Abril, 2013.

BICALHO, C. C. *Estudo do Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília. 2006.

BRAGA, R. A. P. Caracterização das Zonas Estuarinas de Pernambuco. In: Seminário internacional, perspectivas e implicações da carcinicultura estuarina de estado de Pernambuco, 1, 2000, Recife. *Anais...* Editora Bagaço, Recife, p.13-20, 2000.

CAMARGO, R. *Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá*. Tese de Doutorado – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAMPUZANO, F.; NUNES, S.; MALHADAS, M.; NUNES, D.; JARDIM, M.; NEVES, R. Modelação da Hidrodinâmica da Orla Sul da Ilha da Madeira. In; 6ª Jornada Portuguesa de Engenharia Costeira e Portuária. Funchal, 2009.

CARVALHO, N.O.; CUNHA, S. B. Contribuição de Sedimentos do Amazonas para o Oceano. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória, ES, 1997.

COASTAL PLANNING & ENGINEERING DO BRASIL. *Modelagem Numérica como Subsídio às Análises de Impacto das Dragagens de Manutenção e Aprofundamento do Canal de Navegação no Padrão de intrusão Salina na Baía de Paranaguá – PR*. 2010.

CUNHA, C.L.N.; SCUDELARI, A. C. E ROSMAN, P. C. C. “Uso de Técnicas de modelagem para avaliar o transporte de sedimentos no Complexo Estuarino de Paranaguá”. VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. *Anais...* Aveiro, Portugal, 2015.

DHN. Diretoria de hidrografia e Navegação. Centro de Hidrografia da Marinha. *Cartas Náuticas*. Consulta na internet em: Out/2015. Disponível em: [http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\\_disponiveis.html](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html)

DYER, K. R. *Estuaries: a Physical Introduction*. New York, John Wiley & Sons, Edição 2, 195 p. 1997.

DYER, K. Fluxes of suspended sediment in estuaries, and their relationship to equilibrium morphology. In: *Modelling estuary morphology and processes*. Research by Enphasys 2000.

FALKENBERG, A. V. *Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do Complexo Estuarino de Paranaguá com uso de modelagem numérica*. Dissertação de Mestrado em Oceanografia - Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Sul, Brasil, 2009.

FEMAR. Fundação de Estudos do Mar. *Catálogo de estações Maregráficas Brasileiras*. Consulta na internet em: jan/2016. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html>

GARÇÃO, H. F. *Desenvolvimento de modelo lagrangiano de partículas considerando os efeitos do vento e espalhamento de manchas de óleo*. Universidade Federal do Espírito Santo. Dissertação de Mestrado. Vitória - ES. 2010.

GARCIA, G. E. *Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu-PR*. Dissertação de Mestrado – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GUENNEC, B. L.; STRASSER, M. A. O Transporte de Sedimentos em Suspensão no Rio Amazonas. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. *Anais...* São Paulo, Nov. - 2007.

HIDRO-WEB. ANA (Agência Nacional de Águas), *Sistema de Informações Hidrológicas*. Consulta na Internet em: nov/2015. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>.

INPH. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. *Estudo de Sedimentação no Canal de Acesso ao Porto de Paranaguá – PR*. Relatório n. 007/2014

KHORRAM, S.; ERGIL, M. Most Influential Parameters For The Bed-Load Sediment Flux Equations Used in Alluvial Rivers. *Journal of the American Water Resources Association*. JAWRA. Vol 46, No.6. 2010.

KJERFVE, B. & WOLAVER, T. G. 1988. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. *American Fisheries Society Symposium*, 3, p: 26-33.

KNOPPERS, B. A.; BRANDINI, F. P.; THAMM, C. A. Ecological studies in the Paranaguá Bay II. Some physical and chemical characteristics. *Nerítica*, Curitiba, v. 2, p. 1-36, 1987.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. *The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil*. In: SELLINGER, U.; KJERFVE, P. *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Berlin: Springer-Verlag, p. 131-145, 2001.

LAMOUR, M. R. *Morfodinâmica sedimentar da desembocadura do complexo estuarino de Paranaguá – PR*. Tese de Doutorado em Geologia - Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2007.

MANTOVANELLI, A. *Caracterização da dinâmica hídrica e do material em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem*. Dissertação de mestrado em Geologia – Área de Concentração em Geologia Ambiental – Setor de Ciências da Terra-UFPR. 1999.



MARONE, E. Processamento e análise de dados de maré: Discurso dos métodos. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 264 p. 1991.

MARONE, E.; JAMIYANNA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Paraná, Brazil. *Nerítica* 11, pp. 95-107. 1997.

MARONE, E., CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. *Nerítica*, Curitiba, v.8 (1-2), 73-85, 1994.

MAYERLE, R.; NARAYANAN, R.; ETRI, T.; WAHAB, A. K. A. A case Study of Sediment Transport in the Paranaguá Estuary Complex in Brazil. *Ocean Engineering*, v. 106, p. 161-174, 2015.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, v. 18, 761-799, 2003.

MEYER-PETER, E.; MULLER, R. - Formulas for Bed Load Transport , Proceedings, 3rd Meeting of Intern. Assoc. Hydraulic Res., Stockholm, pp. 39-64. 1948.

MIRANDA LB, CASTRO BM & KJERFVE B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo - EDUSP. 424 p.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B.M. E KJERFVE, B. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. EdUSP, Vol. 2, 2012, São Paulo - Brasil. 2012

MORAES, A. C. R. Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do Litoral Brasileiro. 2 ed. *Annablume*, São Paulo, 232 p, 2007.

NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Sediments. In: Davis, R. A. *Costal Sedimentary Environments*. Segunda Revisão, Edição Expandida. Springer-Verlog, New York, Berlin Heidelberg, Tokyo. 1985.

NIMER, E. Climatologia da Região Sul do Brasil: Introdução à climatologia Dinâmica – Subsídios à Geografia Regional do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia*. pp 3-67. 1971.

NOERNBERG, M. A. *Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados in situ e Landsat-TM*. Tese de doutorado em Geologia – Área de Concentração em Geologia Ambiental – Setor de Ciências da Terra-UFPR. 2001.

NOERNBERG, M. A.; LAUTERT, L. F. C.; ARAÚJO, A. D.; MARONE, E.; ANGELOTTI, R.; NETTO Jr, J. P. B.; KRUG, L. A., 2006. Remote sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá estuarine complex Brazil, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), 1627 - 1631. Itajaí, SC, Brazil, ISSN 0749-0208.

NUNES, A. L. Determinação das marés meteorológicas na região da Baía do Espírito Santo e sua influência na drenagem de águas continentais. Dissertação de mestrado- Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. 2007.

PARKER, B. B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions. *Tidal Hydrodynamics*. N.Y. John Wiley & Sons. pp. 125-152. 1991.

PUGH, D. T. Tides, Surges and Mean Sea-Level. Natural Environment Research Council. N.Y. John Wiley & Sons. pp. 486. Swindon, UK. 1996.

RIBAS, T. M. *Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das baías de Antonina e Paranaguá- PR*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2004.

ROSA, L. C. *As Praias Estuarinas da Baía de Paranaguá (Região Sul do Brasil): Aspectos Morfodinâmicos e Ecológicos*. Tese de Doutorado. Programa de Oceanografia Biológica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. 2009.

ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBAHiA®*. COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

ROSENHAGEN, A. G. J. *Aplicação de uma fórmula de transporte de sedimentos considerando Ondas e Corrente em um Modelo Hidro-Sedimentológico*. Dissertação de Mestrado - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. 2013.

ROVERSI, F. *Estudo Hidrodinâmico e de Renovação das Águas do Sistema Estuarino de Santos*. Dissertação de Mestrado - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. 2012.

SANTOS, L. A. S.; *Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino Caravelas – Peruíbe, BA*. Dissertação de mestrado. Área de Oceanografia, Química e Geológica. Universidade de São Paulo. 2011.

SIGAÚQUE, P. J. *Avaliação Hidro-sedimentológica no canal de itajurú-lagoa de Araruama-RJ, devido a sobrelevação do nível médio do mar por mudança climática*. Dissertação de mestrado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. 2013.

SILVA, A. F. *Características Hidrodinâmicas do Estuário da Beira, Moçambique*. Dissertação de Mestrado. UFRJ/COPPE/ Programa de engenharia Oceânica, 2011.

SOUZA, M. M. *Modelagem Computacional do Complexo Estuarino de Paranaguá sob a Influência de ondas, Marés e descarga fluvial*. Dissertação de mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos. Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, 2015.

SPIEGELBERG, G. *Um modelo morfodinâmico: Desenvolvimento e aplicação no reservatório da usina hidroelétrica de estreito no Rio Tocantins*, Dissertação de mestrado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. 2010.

WANG, S. S. Y., WU, W., 2004, River sedimentation and morphology modeling–The state of the art and future development, *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*, Yichang, China, 2004.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part III: Bed forms and alluvial roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 12, p. 1733-1755, 1984.

VAN RIJN, L.C., Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands, 1993.

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

XAVIER, A. G. Estudo da circulação Hidrodinâmica e do Transporte de contaminante no estuário do Rio Iguaçu - Baía de Guanabara. Tese de mestrado. Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1996.

YANG, C.T.; SIMÕES, F.J.M. GSTARS Computer Models and Their Applications, Part I: Theoretical Development. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 23, 2008, pp. 197–211.