

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

ELIANDRO RONAEL GILBERT

CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO DE NAVIOS NA FORMAÇÃO DE CORRENTES E NO  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DE ACESSO AOS PORTOS DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA

Pontal do Paraná

Fevereiro / 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

ELIANDRO RONAEL GILBERT

CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO DE NAVIOS NA FORMAÇÃO DE CORRENTES E NO  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DE ACESSO AOS PORTOS DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Sistemas Costeiros  
e Oceânicos, pelo programa de Pós-Graduação em  
Sistemas Costeiros e Oceânicos – PGSisCO, da  
Universidade Federal do Paraná

Orientador: Dr. Carlos Alexandre Domingos  
Lentini

Coorientador: Dr. Antonio Fernando Härter Fetter  
Filho

Pontal do Paraná

Fevereiro / 2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE:  
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar  
Liliam Maria Orquiza - CRB-9/712

G464c Gilbert, Eliandro Ronael  
Contribuição do tráfego de navios na formação de correntes e no transporte de sedimentos no canal de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina. / Eliandro Ronael Gilbert. – Pontal do Paraná, 2017.  
45 f.; 29 cm.

Orientador: Dr. Carlos Alexandre Domingos Lentini.  
Coorientador: Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

1. Transporte de sedimentos. 2. Portos. 3. Modelagem hidrodinâmica. I. Título. II. Lentini, Carlos Alexandre Domingos. III. Fetter Filho, Antonio Fernando Härter. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.3




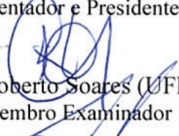
## CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

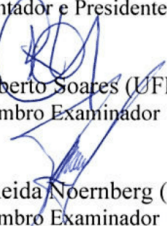
Centro de Estudos do Mar - Setor Ciências da Terra - UFPR  
Avn. Beira-mar, s/nº - Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - Brasil  
Tel. (41) 3511-8644 - Fax (41) 3511-8648 - www.cem.ufpr.br - E-mail: pgsisco@ufpr.br

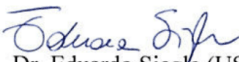
Ata da sessão pública de Defesa de Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos, área de concentração Dinâmica Oceânica e Costeira. Aos vinte e quatro dias do mês de março de 2015, no anfiteatro do Centro de Estudos do Mar, às 16 horas, reuniu-se em sessão pública a Banca Examinadora da prova de Defesa de Dissertação do candidato ao Título de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos, **Eliandro Ronael Gilbert**, composta pelos seguintes membros: Dr. Carlos Alexandre Domingos Lentini (UFBA), como orientador e presidente, Dr. Carlos Roberto Soares (UFPR/CEM), Dr. Maurício Almeida Noernberg (UFPR/CEM) e Dr. Eduardo Siegle (USP), como examinadores. Após os esclarecimentos prestados pelo candidato às argüições feitas pelos membros da Banca, o Sr. Presidente suspendeu temporariamente a sessão a fim de que a Banca se reunisse em sessão secreta para deliberar sobre o resultado. Reaberta a sessão, o Sr. presidente deu conhecimento ao candidato que, de conformidade com o Art. 67 da Resolução 65/09 CEPE, a dissertação foi **aprovada**, apenas condicionada à apresentação, no prazo de sessenta dias, da redação final com as alterações sugeridas.

Pontal do Paraná, 24 de março de 2015.

  
Dr. Carlos Alexandre Domingos Lentini (UFBA)  
Orientador e Presidente

  
Dr. Carlos Roberto Soares (UFPR/CEM)  
Membro Examinador

  
Dr. Maurício Almeida Noernberg (UFPR/CEM)  
Membro Examinador

  
Dr. Eduardo Siegle (USP)  
Membro Examinador

Título da Dissertação: "CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO DE NAVIOS NA FORMAÇÃO DE CORRENTES E NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CANAL DE ACESSO AOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA."

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Carlos Lentini por ter me fornecido a oportunidade de mudar de área e aprender uma nova linha de pesquisa, acreditar na minha capacidade e incentivar minhas ideias. Pela paciência quando eu dava umas sumidas ou quando eu não tinha resultados porque deu tudo errado no modelo e precisava rodar de novo.

Ao meu coorientador, professor Antonio Fetter pela visão crítica e pelo aporte de ideias novas.

Aos membros da banca avaliadora, professores Eduardo Siegle, Mauricio Almeida Noernberg e Carlos Roberto Soares pelas valiosas contribuições ao documento final.

Ao professor Maurício Camargo pelas oportunidades, companheirismo, apoio e confiança desde o início da graduação, e mesmo no mestrado, quando eu decidi seguir novos rumos.

Ao pessoal do Centro de Estudos do Mar, alunos e professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos. Em especial ao Mihael pela grande parceria neste mestrado, pelas infinitas discussões hidro-físico-filosóficas, movidas a muito café, e que na maioria das vezes eu não estava entendendo nada.

À Fernanda, amor da minha vida, por todos esses anos ao meu lado e pela vida que construímos juntos, pelas incontáveis vezes que você ficou pacientemente ao meu lado ouvindo eu explicar algum problema do modelo até eu descobrir a solução e você poder voltar ao que estava fazendo.

## RESUMO

Correntes e ondas geradas pelo tráfego de navios representam um fator importante nos processos de transporte de sedimentos em estuários e corpos da água fechados. Mesmo um pequeno aumento na carga hidrodinâmica pode levar a um aumento significativo no transporte sedimentar, caso o estresse de fundo, devido a fatores naturais, esteja próximo do limite crítico de erosão. Neste estudo, as interações entre a circulação natural provocada pela variação das marés e as correntes provocadas pela passagem de navios, e seus efeitos na remobilização de sedimentos dentro do canal navegável, são investigados por meio de modelagem hidrodinâmica. Alguns estudos de caso foram investigados envolvendo a passagem de dois navios de tamanhos diferentes entrando no Complexo Estuarino de Paranaguá – sul do Brasil - em quatro momentos de maré, i.e., estofos de baixa-mar e preamar e momentos de máxima velocidade de correntes de enchente e vazante. Os navios foram representados no modelo como campos de pressão que se deslocam ao longo da linha de navegação, com dimensões típicas de navios graneleiros e porta-contêineres que frequentam os portos de Paranaguá e Antonina. A interação entre a passagem de navios com diferentes dimensões, a profundidade da coluna da água e a circulação natural em cada momento de maré resultou em distintos padrões de intensidades e direção de fluxos e transporte de sedimentos. A passagem das embarcações provocou picos de velocidade superiores aos observados nos momentos de maré enchente ou vazante sem a presença dos navios. Entretanto, nos cenários de preamar e baixa-mar, os fluxos de retorno não foram suficientemente competentes para provocar uma remobilização efetiva de sedimentos. Os maiores fluxos de retorno foram observados nos cenários em que a circulação natural do ambiente fluiu no sentido contrário à navegação. Nesses cenários, para os dois tipos de navios analisados, o total de sedimentos remobilizados foi superior ao observado apenas pelas correntes de vazante, provocando erosão das margens e deposição no canal navegável. A interação entre a passagem dos navios e as correntes de maré fluindo no mesmo de navegação não produziu fluxos e retorno. Mesmo assim, as alterações hidrodinâmicas provocaram erosão na margem do canal navegável com declividade mais acentuada e deposição dentro do canal. A modelagem das alterações hidrodinâmicas e morfológicas provocadas pelo tráfego de navios utilizando campos móveis de pressão no Delft3D se mostrou uma ferramenta adequada para avaliar os efeitos dessa atividade, que normalmente são difíceis de medir no ambiente.

## ABSTRACT

Ship-induced currents and waves are an important factor in the process of sediment transport in estuaries and restricted waterways. Even a small increase in hydrodynamic load can lead to a significant increase in sediment transport if the background stress, due to natural factors, is close to the critical threshold of erosion. In this study, the interactions between the natural circulation caused by the variation of tides and the ship-induced currents, and their effects on remobilization of sediments within the navigation channel were investigated by a hydrodynamic modeling. Case studies involving the passage of two different ship sizes entering the Paranaguá Estuarine Complex – southern Brazil - were investigated at four tidal moments, i.e. low tide, high tide and maximum speed of flood and ebb currents. The ships were represented in the model as a pressure field that moves along the line of navigation, with typical dimensions of bulk carriers and containers that attend the ports of Paranaguá and Antonina. The interaction between the ships' underway with different dimensions, the depth of the water column and the natural circulation in each tidal moment resulted in distinguished patterns of intensity and direction of return flows and sediment transport. The passage of ships caused higher speed peaks than the ones naturally observed in times of flood or ebb tide without the presence of ships. However, in low and high tide scenarios, return flows were not enough efficient to provoke an effective remobilization of sediments. The highest return flows were observed when the natural circulation flowed in the opposite direction to navigation. In these scenarios, for both types of vessels analyzed, the total of remobilized sediments were higher than the ones observed only by tidal currents, causing erosion of channel margins and deposition in the navigation channel. The interaction between the passage of ships and the tidal currents flowing in the same direction to navigation did not produce return flows. Nevertheless, hydrodynamic changes caused erosion on the navigation channel with steeper slope and deposition within the channel. The modeling of the hydrodynamic and morphological changes caused by the traffic of ships using Delft3D moving pressure fields proved to be a suitable tool to assess the effects of this activity, which is normally difficult to measure in the environment.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
ÁREA DE ESTUDO .....	3
MATERIAIS E MÉTODOS .....	5
Modelo hidrodinâmico .....	5
Critérios de qualidade do modelo hidrodinâmico .....	7
Aquisição de informações dos navios .....	9
Representação do casco dos navios.....	9
Cenários.....	12
Formulações empíricas dos fluxos de retorno.....	13
Transporte de sedimentos.....	14
RESULTADOS .....	15
Qualidade do modelo .....	15
Recortes temporais .....	16
Alterações hidrodinâmicas .....	18
Comparação com as correntes calculadas .....	22
Implicações para o transporte de sedimentos .....	24
DISCUSSÃO.....	29
CONCLUSÃO .....	33
LITERATURA CITADA.....	34

1 **Contribution of ship traffic on currents and sediment transport at the navigation channel of**  
2 **Paranaguá and Antonina ports**

3

4 Contribuição do tráfego de navios na formação de correntes e no transporte de sedimentos no canal de  
5 acesso aos portos de Paranaguá e Antonina

6

7 **Revista Pretendida:** Journal of Coastal Research (J Coastal Res), ISSN (0749 - 0208), Fator de  
8 Impacto (JCR, 2014) = 0,980, Qualis CAPES para a área de Biodiversidade = Estrato B3.

9

10 Eliandro R. Gilbert<sup>1</sup>, Carlos A. D. Lentini<sup>2</sup>, Antônio F. H. Fetter Filho<sup>3</sup>

11

12 <sup>1</sup> Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná - UFPR. Pontal do Paraná – PR, Brasil.

13 <sup>2</sup> Instituto de Física – Departamento de Física da Terra e do Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia -  
14 UFBA. Campus Ondina, Salvador - BA

15 <sup>3</sup> Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa  
16 Catarina - UFSC. Campus Universitário, Florianópolis - SC, Brasil.

17

18 **Keywords:** Paranaguá Estuarine Complex, container ships, bulk carrier ships, return flow, numerical  
19 modeling

20 **Palavras-chave:** Complexo Estuarino de Paranaguá, navios porta-contêiner, navios graneleiros, fluxos  
21 de retorno, modelagem numérica

22

23

## INTRODUÇÃO

24 A crescente demanda por energia e recursos minerais e a contínua globalização dos mercados  
25 aumentaram o volume de mercadorias transportadas por longas distâncias. Desde 1950, a taxa anual  
26 de crescimento do comércio internacional tem sido quase o dobro da atividade econômica global  
27 (Gelpke e Visbeck, 2010). Como resultado dos avanços tecnológicos, o tamanho e a velocidade dos  
28 navios aumentaram. Para atender ao crescimento substancial do tráfego e tamanho de navios, os portos

29 precisam investir continuamente em dragagens de aprofundamento dos canais navegáveis, ampliação  
30 dos terminais portuários e redução do tempo gasto nas operações de carga e descarga.

31 O desenvolvimento econômico de muitas regiões costeiras é fortemente dependente da  
32 qualidade e capacidade operacional de seus portos e canais de acesso. Historicamente, os portos são  
33 construídos em ambientes abrigados, como estuários e rios, devido à proteção natural da ação de ondas  
34 e a segurança de navegação. Entretanto, os estuários são ambientes dinâmicos, sujeitos a interação de  
35 forçantes físicas e biogeoquímicas, apresentando grande fragilidade às atividades antropogênicas  
36 (Kennish, 2002). Em relação às atividades portuárias, os impactos ambientais são comumente  
37 relacionados às operações de dragagens, tráfego de embarcações, despejo acidental de substâncias e  
38 invasão de espécies exóticas via água de lastro (Trozzi e Vaccaro, 2000).

39 Estudos investigando os efeitos do tráfego de embarcações comerciais na hidrodinâmica  
40 costeira e transporte de sedimentos têm aumentado nas últimas décadas. Dentre esses efeitos, estão as  
41 correntes e ondas geradas por embarcações, que representam um fator importante nos processos de  
42 erosão costeira e transporte de sedimentos em rios (Nascimento *et al.*, 2010; Stockstill e Berger, 2001),  
43 lagos (Hofmann *et al.*, 2008) e estuários (Bauer *et al.*, 2002; Kelpšaitė *et al.*, 2009; Soomere, 2005)  
44 que estejam nas rotas de transporte marítimo. A turbulência, causada pela passagem de embarcações,  
45 pode ressuspender quantidades significativas de sedimentos (Houser, 2011). Uma vez na coluna da  
46 água, esses sedimentos podem ser transportados pelas correntes para o interior do canal navegável,  
47 causando assoreamento e, conseqüentemente, aumentando a necessidade de novas dragagens  
48 (Umgiesser *et al.*, 2004). Mesmo um pequeno aumento na carga hidrodinâmica pode levar a um  
49 aumento significativo no transporte sedimentar caso o estresse de fundo, devido a fatores naturais,  
50 esteja próximo do limite crítico de erosão. Alguns estudos revelam que, em locais onde o tráfego de  
51 embarcações é muito intenso, a energia das ondas e das correntes geradas por embarcações é maior do  
52 que a energia das ondas de gravidade superficiais, o que as tornam forçantes hidrodinâmicas relevantes  
53 no transporte sedimentar (Houser, 2010; Kelpšaitė *et al.*, 2009).

54 Medições *in situ* da perturbação hidrodinâmica provocada pelo tráfego de embarcações são  
55 complexas devido à área de influência da perturbação (próximo ou mesmo abaixo do casco da  
56 embarcação, no caso dos fluxos de retorno) e à interação entre as características da embarcação (e.g.,  
57 dimensões, velocidade, rota), a geomorfologia local e forçantes ambientais, tais como correntes, marés  
58 e ondas. Por esta razão, a modelagem hidrodinâmica torna-se uma ferramenta adequada para estudos  
59 dessa natureza, uma vez que integra variáveis ambientais no tempo e no espaço, permitindo a  
60 simulação de cenários gerais e/ou estudos de casos específicos de forma a avaliar os efeitos de

61 perturbações antropogênicas na hidrodinâmica e geomorfologia de regiões costeiras, rios e estuários  
62 (Lesser *et al.*, 2004).

63 Com base no exposto, este estudo avalia como as interações entre a circulação estuarina e as  
64 alterações hidrodinâmicas provocadas pelo tráfego de navios afetam a remobilização e transporte de  
65 sedimentos dentro de um canal navegável. Para isto, são investigados os efeitos da passagem de navios  
66 de diferentes tamanhos em momentos de velocidade máxima de correntes de maré enchente e vazante,  
67 bem como em momentos de estofa, de forma a isolar o efeito das correntes de maré e avaliar também  
68 a influência da variação de profundidade do canal navegável.

69

70

## ÁREA DE ESTUDO

71 Situado no sul do Brasil (48°25'W, 25°30'S), o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP)  
72 apresenta uma área superficial de 612 km<sup>2</sup>, sendo composto por dois corpos de água principais, as  
73 baías de Paranaguá e Antonina no eixo leste-oeste, e as baías de Laranjeiras e Pinheiros no eixo sul-  
74 norte (Lana *et al.*, 2001). A conexão com o oceano é feita através de duas desembocaduras, norte e sul,  
75 denominadas de acordo com sua localização em relação à Ilha do Mel (Figura 1). Na desembocadura  
76 sul, está localizado o canal navegável que dá acesso aos portos de Paranaguá e Antonina. Esses portos  
77 operam com carga geral, granéis sólidos e líquidos, congelados, contêineres e veículos. O tamanho e  
78 número de navios que adentram o CEP pelo canal navegável em direção aos portos de Paranaguá e  
79 Antonina têm crescido a cada ano (Soares e Lamour, 2008), aumentando a necessidade de dragagens  
80 de manutenção e aprofundamento do canal. Até o momento não foram realizados estudos sobre o efeito  
81 do tráfego de embarcações na hidrodinâmica local e no transporte de sedimentos nessa região.

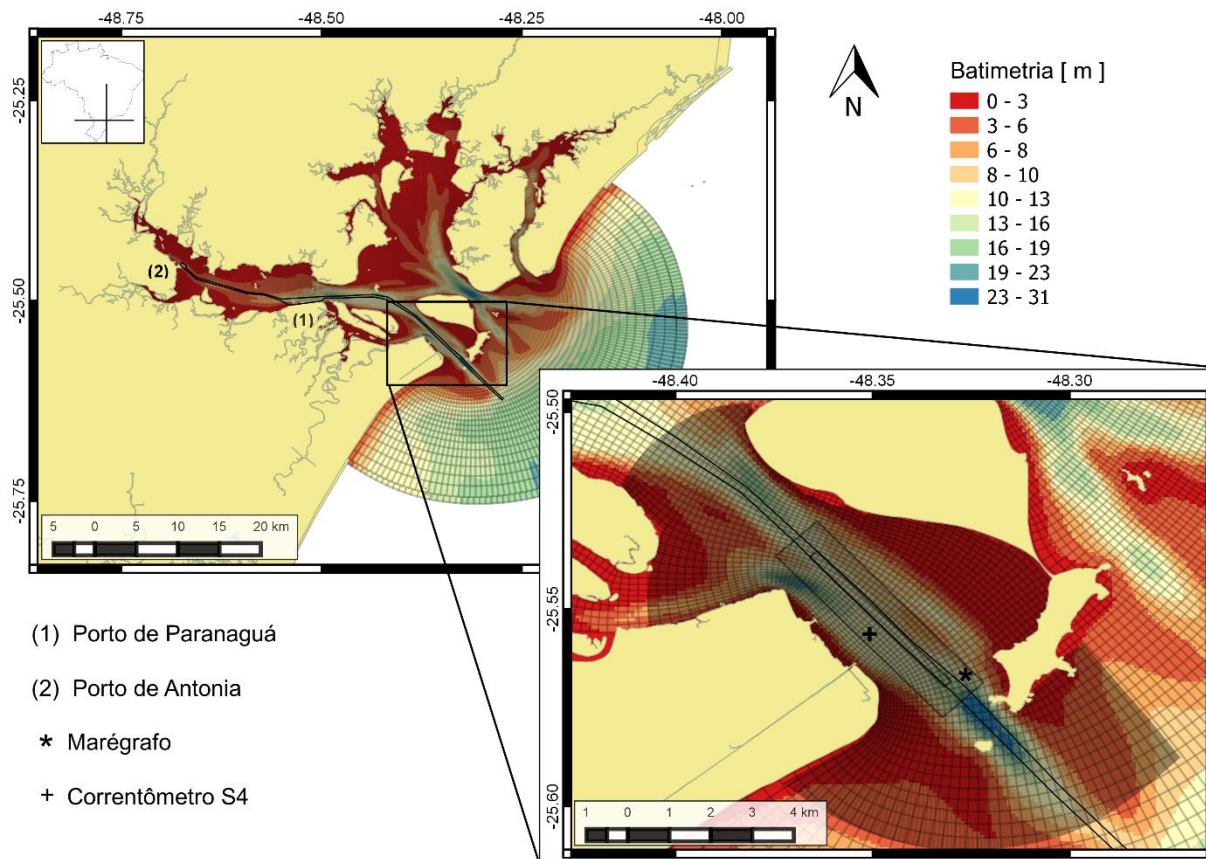


Figura 1 – Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com indicação do canal navegável de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina. A batimetria (em metros) do CEP está identificada por cores, sobreposta à malha utilizada nas simulações numéricas. Em destaque a desembocadura sul, onde dados numéricos foram confrontados com as observações *in situ* de um marégrafo (estrela) e um correntômetro S4 (cruz).

82

83 O regime de marés é predominantemente semi-diurno. Sua variação aumenta estuário adentro,  
 84 especialmente durante períodos de sizígia, de 1,7 m na desembocadura até 2,7 m em Antonina (Marone  
 85 e Jamiyanaa, 1997). A onda de maré se propaga estuário adentro com características de onda  
 86 progressiva na desembocadura e estacionária nas regiões internas do estuário (Lana *et al.*, 2001). A  
 87 circulação no CEP é dominada principalmente pelas correntes de maré que acompanham o canal  
 88 navegável, com predominância das correntes de vazante sobre as de enchente (Noernberg *et al.*, 2007).  
 89 A crescente influência do atrito lateral e de fundo estuário adentro, o aporte de água doce e a circulação  
 90 residual tornam a velocidade média das correntes de maré vazante superiores às de enchente (Marone  
 91 *et al.*, 1995; Mantovanelli *et al.*, 2004). A Ilha do Mel, juntamente com o delta de maré vazante  
 92 formado na desembocadura, protege o interior do CEP das condições de ondas de alta energia (Lessa  
 93 *et al.*, 1998). As ondas que adentram a desembocadura sul do CEP provêm principalmente de sudeste,  
 94 apresentando altura média de 0,5 m e período de 3 a 7 s (Lana *et al.*, 2001).

95 Este estudo foi realizado na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (Figura  
96 1, em destaque). Nessa região, o canal navegável apresenta formato retilíneo e profundidade variando  
97 entre 14 e 16 m, dependendo do momento da maré. O diâmetro médio dos sedimentos de fundo na  
98 região é predominantemente composto por areia fina com grau de seleção variando de bem a muito  
99 bem selecionado, e porcentagens de sedimentos finos inferiores a 10 % (Lamour *et al.*, 2004).

100

101

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 102 **Modelo hidrodinâmico**

103 As simulações foram realizadas com o auxílio do modelo hidrodinâmico Delft3D,  
104 desenvolvido pela Deltares em Delft, Holanda. O modelo funciona em módulos integrados que  
105 permitem simulações de fluxos, geração e propagação de ondas, qualidade de água, transporte de  
106 sedimentos e evolução morfológica (Lesser *et al.*, 2004), proporcionando uma abordagem  
107 multidisciplinar para estudos numéricos de curto e longo prazo em ambientes aquáticos, tais como  
108 lagos, rios, costas e estuários. A computação em módulos integrados do Delft3D permite a interação e  
109 retroalimentação entre os diferentes processos, tornando a simulação mais robusta, além de aumentar  
110 a velocidade computacional (Lesser *et al.*, 2004). Dentre os módulos do Delft3D, o principal é o  
111 FLOW, que resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis utilizando as  
112 aproximações de águas rasas e de Boussinesq. A solução das equações se dá pela discretização da  
113 região de interesse em uma malha retangular, curvilínea ou esférica através da aplicação do método de  
114 diferenças finitas (Lesser *et al.*, 2004).

115 O domínio da simulação foi decomposto em três malhas virtuais abrangendo a desembocadura  
116 sul, com maior refinamento no interior do canal navegável, sendo: (1) uma malha curvilínea externa,  
117 adaptada à linha de costa; (2) uma malha equidistante, localizada no entorno do canal navegável, com  
118 tamanho horizontal de célula de 20 x 21 m; e (3) uma malha equidistante, localizada no canal  
119 navegável, com tamanho horizontal de célula de 5 x 7 m (Figura 2 e Tabela 1). Cada malha foi  
120 discretizada verticalmente em 14 camadas sigma, com maior refinamento próximo ao fundo e à  
121 camada superficial. As camadas sigma foram definidas em função da profundidade da coluna da água  
122 com as seguintes espessuras: 5%, 5%, 5%, 7,5%, 7,5%, 10%, 10%, 10%, 10%, 7,5%, 7,5%, 5%, 5%,  
123 e 5%, partindo da camada superficial para o fundo.

Tabela 1 – Detalhes das malhas virtuais e das configurações utilizadas no modelo hidrodinâmico.

Malha	Tipo	Dimensões (m)
1	Curvilínea	Variável
2	Equidistante	20 x 21
3	Equidistante	5 x 7

Parâmetro	Valor
Passo de tempo (s)	5
Período de simulação (dias)	16
Viscosidade horizontal ( $m^2.s^{-1}$ )	1
Difusividade horizontal ( $m^2.s^{-1}$ )	10
Rugosidade	Variável

124

125 O modelo possui quatro fronteiras abertas, sendo duas localizadas fora do estuário e duas  
 126 dentro. Séries temporais de elevação e salinidade, utilizadas como parâmetros de entrada para as  
 127 fronteiras do modelo, foram geradas por um acoplamento a um modelo hidrodinâmico baroclínico  
 128 desenvolvido e validado para todo o CEP por Souza (2015). A rugosidade de fundo do modelo foi  
 129 especificada para cada célula das malhas, levando em consideração a profundidade e o diâmetro médio  
 130 dos sedimentos de fundo. O coeficiente de rugosidade utilizado foi de Chezy, calculado a partir da  
 131 formulação de White-Colebrook.

132 As simulações foram realizadas para o período entre 19 de agosto de 2012 e 04 de setembro de  
 133 2012, utilizando um passo de tempo de 5 s. Os dados disponíveis na região de interesse, nesse recorte  
 134 temporal, consistem em medições de elevação do nível do mar obtidas por um marégrafo para todo o  
 135 período, medições de salinidade e correntes em meio ciclo de maré de sizígia, obtidas por perfilagem  
 136 de S4 (Libardoni, 2004). Esses dados foram utilizados para verificar a qualidade das simulações das  
 137 malhas aninhada e geral.

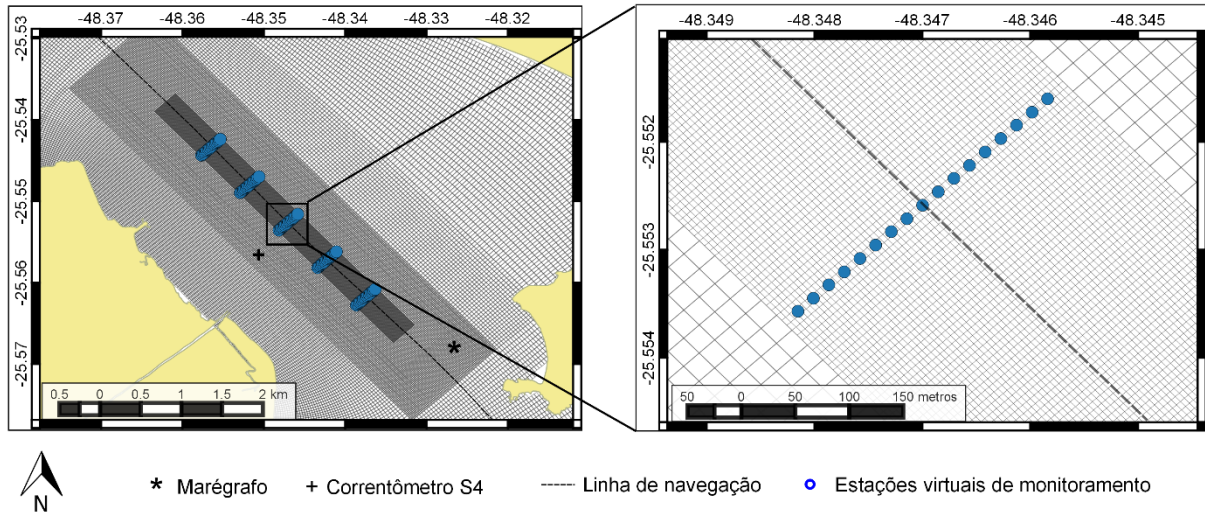


Figura 2 – Malhas do modelo acoplado evidenciando o refinamento progressivo em direção ao centro do canal navegável. As linhas azuis (painel esquerdo) indicam séries de estações hidrográficas virtuais, perpendiculares ao canal navegável e distantes 700 m entre si, enquanto os círculos azuis (painel direito) representam a disposição das estações de uma série.

138

### 139 Critérios de qualidade do modelo hidrodinâmico

140 Os critérios para avaliar a qualidade do modelo baseiam-se nas análises gráficas e estatísticas  
 141 de séries temporais entre dados medidos e modelados. As técnicas de comparação gráfica são  
 142 essenciais para a avaliação apropriada dos modelos, uma vez que a comparação entre séries temporais  
 143 medidas e modeladas ajuda a identificar diferenças temporais de amplitude e fase, formato de curvas  
 144 e tendências (Legates e McCabe, 1999). Em geral, mais de uma análise estatística é utilizada para  
 145 avaliar a qualidade de modelos, visto que cada análise tem suas vantagens e desvantagens.

146 O erro absoluto médio (*mean absolute error* - MAE) descreve a diferença entre os dados  
 147 medidos e modelados, como visto na Equação 1:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i^{mod} - X_i^{obs}|}{n} \quad (1)$$

148 onde  $X_i^{mod}$  representa os dados modelados,  $X_i^{obs}$  os dados observados em campo e  $n$  o número de  
 149 elementos da série temporal. Valores próximos a zero indicam ajuste perfeito entre o resultado do  
 150 modelo e os dados observados em campo. O índice de erro MAE tem as vantagens de não lidar com  
 151 diferenças quadráticas, sendo menos suscetível a discrepâncias provocadas por *outliers*, e manter a  
 152 unidade de medida da variável analisada.

153 Índices de erro adimensionais apresentam a vantagem de padronizar os resultados em uma  
 154 escala comparável com outros modelos e com escalas qualitativas. O erro absoluto médio relativo  
 155 (*relative mean absolute error* – RMAE) é calculado como a razão entre a média das diferenças  
 156 absolutas dos dados medidos e modelados, subtraído do erro de medição, e a média dos dados medidos,  
 157 como mostrado na Equação 2:

$$RMAE = \frac{\langle |X^{mod} - X^{obs}| - \Delta X \rangle}{\langle |X^{obs}| \rangle} \quad (2)$$

158 onde  $X^{mod}$  e  $X^{obs}$  representam os dados modelados e medidos, respectivamente,  $\Delta X$  representa o erro  
 159 de medição e  $\langle \dots \rangle$  a média da série temporal. De acordo com Van Rijn *et al.* (2003), erros de medição  
 160 da ordem de 0,1 m para altura de onda e 0,05 para correntes são adequados. O mesmo erro de medição  
 161 e escala qualitativa da altura de onda foi utilizado para comparações de nível da água. A média das  
 162 diferenças absolutas dos dados medidos e modelados, subtraído do erro de medição, não pode ser  
 163 inferior a zero. Valores de RMAE próximos a zero indicam que o desempenho do modelo é excelente,  
 164 enquanto que valores acima de 0,2 para nível da água e 0,5 para correntes indicam que o modelo não  
 165 está representando adequadamente o ambiente.

166 Associado aos índices MAE e RMAE, a qualidade do modelo foi verificada pelo cálculo do  
 167 índice de concordância ( $dr$ ), proposto por Willmott *et al.* (2012), que avalia a concordância entre os  
 168 dados modelados e os medidos através da Equação 3:

$$dr = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i^{mod} - X_i^{obs}|}{c \sum_{i=1}^n |X_i^{obs} - \bar{X}^{obs}|}, & \text{quando } \sum_{i=1}^n |X_i^{mod} - X_i^{obs}| \leq c \sum_{i=1}^n |X_i^{obs} - \bar{X}^{obs}| \\ \frac{c \sum_{i=1}^n |X_i^{obs} - \bar{X}^{obs}|}{\sum_{i=1}^n |X_i^{mod} - X_i^{obs}|} - 1, & \text{quando } \sum_{i=1}^n |X_i^{mod} - X_i^{obs}| > c \sum_{i=1}^n |X_i^{obs} - \bar{X}^{obs}| \end{cases} \quad (3)$$

169 onde  $c = 2$ . O índice de concordância  $dr$  varia entre -1 e +1, e avalia a relação entre o somatório da  
 170 magnitude dos erros e o somatório da magnitude dos desvios dos dados observados. Um valor de  $dr$   
 171 igual a zero indica que soma da magnitude dos erros e a magnitude dos desvios dos dados observados  
 172 são iguais, enquanto que um valor de  $dr$  igual a 0,5 indica que a magnitude dos erros entre os dados  
 173 modelados e medidos é a metade da magnitude dos desvios dos dados observados. Por outro lado, um  
 174  $dr$  igual a -0,5 indica que o somatório dos erros é o dobro da soma dos desvios dos dados medidos.

## 175 **Aquisição de informações dos navios**

176 As dimensões dos navios que operam nos portos de Paranaguá e Antonina foram obtidas por  
177 consultas bimestrais ao serviço de previsão de manobras da empresa de praticagem local, entre os anos  
178 de 2013 e 2014. Com essas informações, foram calculadas as dimensões médias de acordo com cada  
179 tipo de navio (Tabela 2). Como a maioria dos navios que trafegam pelo canal navegável são do tipo  
180 porta-contêiner e graneleiros, as simulações consideraram somente as dimensões médias desses dois  
181 tipos de navios.

182 A rota e a velocidade dos navios, no momento em que passam pela área de estudo, foram  
183 estimadas através de dados transmitidos por AIS (*Automatic Identification System*). Esse sistema  
184 transmite continuamente um conjunto de informações, tais como: nome da embarcação, dimensões,  
185 calado, posição, velocidade, e detalhes da viagem como curso, destino e carga entre outros (Cairns,  
186 2005). Essas informações foram obtidas no *website marinetraffic.com*. De acordo com os dados  
187 obtidos por AIS, a velocidade média dos navios ao passarem pela área de estudo foi  $6,74 \text{ m.s}^{-1}$ ,  
188 atingindo máximos de  $10,18 \text{ m.s}^{-1}$ . Baseado nessas informações, a velocidade dos navios nas  
189 simulações realizadas neste estudo foi mantida constante em  $7 \text{ m.s}^{-1}$ .

Tabela 2 – Dimensões médias por tipo de navio.

Tipo de navio	Comprimento (m)	Largura (m)	Calado (m)
Porta-contêiner*	280,77	40,20	9,70
Cargas gerais	168,57	26,49	7,98
Graneleiros*	205,70	31,81	8,14
<i>Roll on – Roll off</i>	190,01	31,98	8,51
Tanque	171,65	28,85	8,63

\* Tipos de navios considerados nas simulações.

190

## 191 **Representação do casco dos navios**

192 Os navios são representados no domínio como um campo de pressão que se desloca ao longo  
193 do canal navegável, seguindo a mesma rota e velocidade média dos navios que frequentam os portos  
194 de Paranaguá e Antonina. Os campos móveis de pressão têm sido utilizados para a simulação de ondas  
195 e correntes geradas por embarcações comerciais em baías (Torsvik e Soomere, 2008; Torsvik e  
196 Soomere, 2009), rios e hidrovias (Nascimento *et al.*, 2010; Stockstill e Berger, 2001), além de estudos  
197 numéricos da ressuspensão de sedimentos provocadas por embarcações (Ji *et al.*, 2015). A distribuição

198 de um campo de pressão de forma a representar o casco de uma embarcação pode ser dada pela  
 199 Equação 4, descrita por Bayraktar *et al.* (2013):

$$P(x, y) = P_0 \left[ 1 - C_L \left( \frac{x}{L} \right)^4 \right] \left[ 1 - C_B \left( \frac{y}{B} \right)^2 \right] \exp \left[ -a \left( \frac{y}{B} \right)^2 \right] \quad (4)$$

200 onde  $P_0$  é a pressão máxima relativa ao calado da embarcação;  $L$  representa o comprimento e  $B$  a  
 201 largura da embarcação;  $a$ ,  $C_B$  e  $C_L$  são parâmetros de forma fixos em 16, 2 e 16, respectivamente. O  
 202 campo de pressão  $p(x, y)$  é calculado apenas nos intervalos  $-(L/2) \leq x \leq (L/2)$  e  $-(B/2) \leq y \leq$   
 203  $(B/2)$  e mantido em um valor fixo para o resto do domínio. Esta equação, porém, subestima o volume  
 204 total do que seria o casco submerso de uma embarcação. Para contornar esse problema e buscar um  
 205 formato mais próximo do observado nas embarcações atuais, principalmente no tocante ao fundo  
 206 plano, os expoentes e parâmetros de forma da equação acima foram alterados e o parâmetro  $P_0$  foi  
 207 expandido, como pode ser visto na Equação 5:

$$P(x, y) = P_{atm} + g\rho D \left[ 1 - C_L \left( \frac{x}{L} \right)^4 \right] \left[ 1 - C_B \left( \frac{y}{B} \right)^2 \right] \exp \left[ -a \left( \frac{y}{B} \right)^4 \right] \quad (5)$$

208 onde  $P_{atm}$  corresponde à pressão atmosférica ao nível do mar,  $g$  à aceleração gravitacional,  $\rho$  à  
 209 densidade da água e  $D$  corresponde ao calado do navio. Os valores dos parâmetros de forma  $a$ ,  $C_B$  e  
 210  $C_L$  foram alterados para 16, 4 e 16, respectivamente. Com esses ajustes, o campo de pressão perde o  
 211 formato esguio nas extremidades, porém ganha em volume e apresenta um fundo mais plano (Figura  
 212 3). A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para a formação dos campos de pressão  
 213 representando os dois tipos de embarcação estudadas. As dimensões dos navios porta-contêiner e  
 214 graneleiros, apresentadas na Tabela 2, foram ajustadas de modo que os valores sejam múltiplos das  
 215 dimensões da malha mais refinada (5 x 7 m).

216

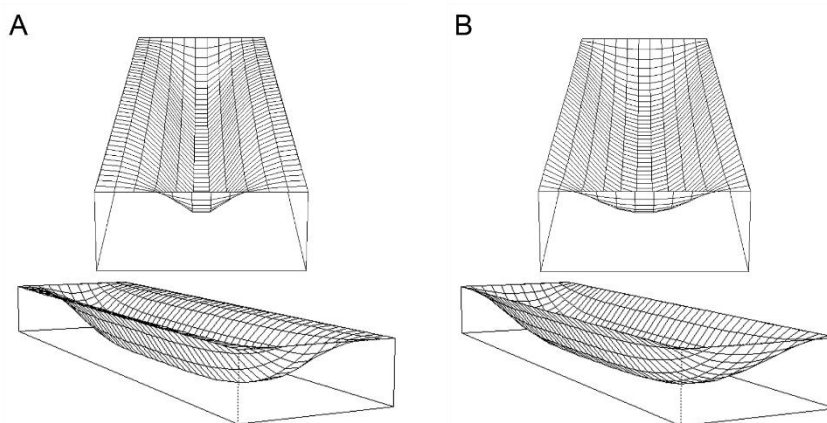


Figura 3 - Representação de um campo de pressão em formato de casco de navio: **A**) de acordo com a Equação 4, e **B**) utilizado neste estudo, de acordo com a Equação 5.

217

218 O deslocamento do campo de pressão no domínio da simulação foi realizado em três etapas:  
 219 (1) formação do campo de pressão no centro do canal navegável, deslocando-se em velocidade  
 220 constante de  $7 \text{ m.s}^{-1}$  e aumentando progressivamente a pressão; (2) deslocamento do campo de pressão  
 221 completamente formado ao longo do canal navegável; (3) desaparecimento do campo de pressão  
 222 através da redução progressiva da pressão até se igualar à pressão atmosférica. As etapas 1 e 3 foram  
 223 realizadas pela aplicação de um fator multiplicador cumulativo de 0,02 por segundo sobre os valores  
 224 da pressão atmosférica na área de interesse. Dessa forma, o campo de pressão demorou 50 segundos  
 225 para se formar ou desaparecer completamente enquanto percorria o caminho ao longo do canal  
 226 navegável.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na formulação do campo de pressão representando os navios porta-contêiner e graneleiros.

Parâmetro	Descrição	Valor	
$P_{atm}$	Pressão atmosférica ao nível do mar (Pa)	101.325	
$g$	Aceleração gravitacional ( $\text{m.s}^{-2}$ )	9,81	
$\rho$	Densidade da água ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	1.025	
$D$	Calado do navio (m)	Porta-contêiner	9,70
		Graneleiro	8,14
$L$	Comprimento do navio (m)	Porta-contêiner	280,00
		Graneleiro	203,00
$B$	Largura do navio (m)	Porta-contêiner	40,00
		Graneleiro	30,00

227

## 228 Cenários

229 Após a verificação da qualidade da implementação do modelo, os estudos de caso foram  
230 realizados em quatro momentos de maré de sizígia, i.e., estofos de baixa-mar e preamar, e momentos  
231 de máxima velocidade de correntes de enchente e vazante. No total, foram investigados 12 cenários,  
232 compreendendo combinações entre os quatro momentos de maré selecionados e dois tipos de navios  
233 (porta-contêiner e graneleiro) navegando estuário adentro, mais quatro cenários sem a presença de  
234 navios (Tabela 4).

235 As simulações dos estudos de caso foram realizadas utilizando passo de tempo de 0,3 s e  
236 partindo de arquivos de reinício da simulação realizada para todo o período. A escolha do passo de  
237 tempo levou em consideração o tamanho da malha numérica por onde o campo de pressão se desloca  
238 (7 m) e a velocidade de deslocamento das embarcações na região ( $7 \text{ m.s}^{-1}$ ), o que demanda que o campo  
239 de pressão se desloque uma célula por segundo ao longo do domínio. Dessa forma, foi escolhido um  
240 passo de tempo menor que um segundo para garantir que os cálculos sejam realizados antes que o  
241 campo de pressão se mova para a próxima célula do domínio.

Tabela 4 – Características dos cenários estudados.

Parâmetro	Valor
Momentos de maré	Preamar, vazante, baixa-mar e enchente
Tipos de navios	Sem navio, graneleiro e porta-contêiner
Direção de navegação	Estuário adentro
Velocidade de deslocamento	$7 \text{ m.s}^{-1}$
Passo de tempo	0,3 segundos

242

243 Como mostrado na Figura 2, cinco séries de estações virtuais de monitoramento foram  
244 distribuídas ao longo do canal navegável, distantes 700 m entre si, para registrar variações na elevação,  
245 no campo de velocidades e na direção das correntes decorrentes da passagem do campo de pressão  
246 representando os navios. Cada série era composta por uma estação localizada exatamente na linha de  
247 navegação e outras oito estações dispostas em cada lado, distantes 20, 40, 60, 80 100, 120, 140 e 160  
248 m da linha de navegação.

249

## 250 **Formulações empíricas dos fluxos de retorno**

251 A magnitude dos fluxos de retorno dos cenários analisados foi comparada com formulações  
252 empíricas. Segundo Hochstein e Adams (1989), a velocidade crítica ( $V_{cr}$ ) de navegação em águas rasas  
253 é expressa por:

$$V_{cr} = K \left[ \frac{gA_c}{B_c} \right]^{0,5} \quad (6)$$

254 onde  $K$  = fator de constrição, sendo função da razão de bloqueio  $n = A_c/A_s$  e a razão  $Ls/Bs$ ;  $A_c$  =  
255 área da seção transversal do canal;  $A_s$  = área da seção transversal da porção submersa do casco do  
256 navio;  $Ls$  = comprimento do navio;  $B_c$  = largura do canal;  $Bs$  = largura do navio;  $g$  = aceleração  
257 gravitacional. A velocidade média do fluxo de retorno na seção transversal ( $V_{rs}$ ) é expressa por:

$$V_{rs} = V_s [(NB_F - B_F + 1)^{0,5} - 1] \quad (7)$$

258 onde  $V_s$  = velocidade de deslocamento do navio;  $N$  é expresso por:

$$N = \left[ \frac{n}{n-1} \right]^{2,5} \quad (8)$$

259 e o parâmetro  $B_F$  depende do valor da razão entre a velocidade desenvolvida pelo navio e a velocidade  
260 crítica de navegação do canal, conforme a equação abaixo.

$$B_F = \begin{cases} 0,3e^{1,8V_s/V_{cr}}, & \text{quando } V_s/V_{cr} \leq 0,65 \\ 1, & \text{quando } V_s/V_{cr} \geq 0,65 \end{cases} \quad (9)$$

261 A distribuição lateral dos fluxos de retorno da embarcação até a linha de costa é uma função  
262 exponencial, expressa por:

$$V_r(y) = k_1 e^{(-y/k_2)} \quad (10)$$

263 onde  $V_r(y)$  representa a velocidade do fluxo de retorno na distância  $y$  a partir da linha de navegação;  
264 os termos  $k_1$  e  $k_2$  são definidos pelas equações:

$$k_1 = \alpha V_{rs} \quad (11)$$

$$k_2 = B_{side}/\alpha [1 - e^{-\alpha F(\alpha)}] \quad (12)$$

265 onde  $B_{side}$  = distância da embarcação até a linha de costa;  $F(\alpha)$  pode ser calculado como:

$$F(\alpha) = 0,42 + 0,52 \ln \alpha \quad (13)$$

266 e o parâmetro  $\alpha$  depende o valor da razão entre a largura do canal e do navio, sendo expresso por:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{quando } B_c/B_s \leq 2,5 \\ 0,114 B_c/B_s + 0,715, & \text{quando } B_c/B_s \geq 2,5 \end{cases} \quad (14)$$

267 Para o cálculo dos fluxos de retorno, a largura do canal foi definida como sendo 3000 m e a  
268 profundidade variou em função do momento de maré. O comprimento, largura e calado dos navios  
269 constam na Tabela 3. Como a formulação descrita por Hochstein e Adams (1989) não leva em  
270 consideração a velocidade ambiente das correntes, as comparações se limitaram aos momentos de  
271 preamar e baixa-mar.

## 272 **Transporte de sedimentos**

273 O transporte de sedimentos não coesivos no Delft3D segue os princípios descritos por Van Rijn  
274 (2007a, b), com a separação do transporte em carga de fundo e em suspensão. O transporte de  
275 sedimentos em suspensão é calculado pela equação de advecção e difusão, e inclui o efeito da carga  
276 de sedimentos em suspensão na densidade da água. A troca de sedimento entre o fundo e a coluna da  
277 água ocorre por um sistema de fontes e sumidouros localizado na camada vertical imediatamente acima  
278 da altura de referência, calculada em função da rugosidade de fundo. O transporte por carga de fundo  
279 representa o transporte de sedimentos em contato com fundo, abaixo da altura de referência, sendo  
280 influenciado pela direção do fluxo e pelas variações na batimetria (Lesser *et al.*, 2004). Os sedimentos  
281 do domínio foram definidos como uma única fração de areia fina com diâmetro médio (d50) de 180  
282  $\mu\text{m}$ , representativo da região de estudo (Lamour *et al.*, 2004). A atualização batimétrica foi desabilitada  
283 no modelo. Além das estimativas de transporte em suspensão e por carga de fundo, os efeitos da  
284 passagem dos campos de pressão representando os navios na remobilização de sedimentos no canal  
285 navegável foram avaliados pela variação na altura da camada sedimentar, evidenciando zonas de  
286 erosão e deposição de sedimentos.

287

289 **Qualidade do modelo**

290 A Figura 4 mostra a comparação do sinal de elevação do nível do mar entre os dados medidos  
 291 pelo marégrafo e calculados a partir das malhas geral e aninhada para todo o período da simulação. O  
 292 índice RMAE foi de 0,03 nas comparações entre o modelo hidrodinâmico e a série temporal de dados  
 293 medidos, com MAE de 7 cm, indicando que a oscilação do nível do mar foi bem representada pelo  
 294 modelo. O índice  $dr$  foi de 0,88, indicando ótima concordância entre os dados medidos e modelados.  
 295 Na comparação entre as malhas geral e aninhada, o índice RMAE foi de 0,01 com erro de 1 centímetro  
 296 e  $dr$  de 0,99, indicando que o acoplamento entre essas duas malhas não prejudicou o padrão de  
 297 oscilação do nível do mar.

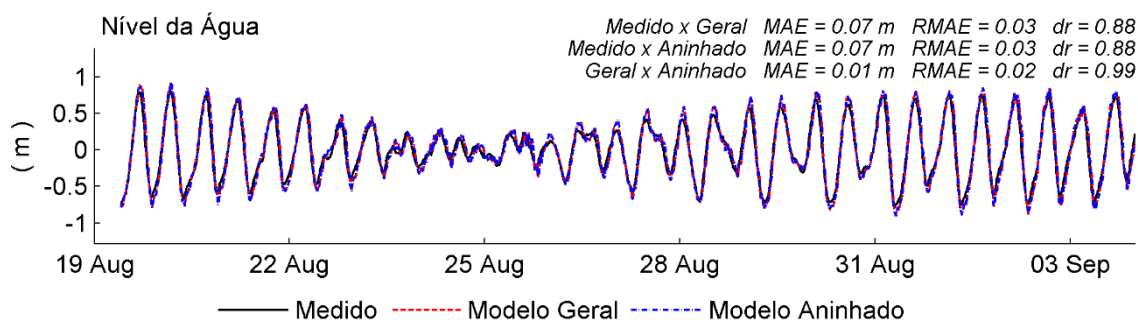


Figura 4 – Comparação da oscilação do nível da água entre os dados medidos pelo marégrafo e calculados a partir das malhas geral e aninhada para todo o período da simulação. Para tornar as séries comparáveis, foram calculadas médias a cada 10 minutos para as séries de dados medidos e modelados.

298

299 Nas comparações dos dados de correntes para a componente  $u$ , orientada longitudinalmente em  
 300 relação ao canal navegável, o índice RMAE entre as simulações e a série medida ficou dentro do  
 301 considerado bom, com MAE de  $0,19 \text{ m.s}^{-1}$ , e concordância de 0,86 entre a grade aninhada e a série  
 302 medida (Figura 5). Para a componente  $v$ , orientada transversalmente em relação ao canal navegável, o  
 303 índice RMAE entre as simulações e a série medida ficou dentro do considerado satisfatório, com MAE  
 304 de  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$  e  $dr$  de 0,64 entre a malha geral e a série medida, e MAE de  $0,07 \text{ m.s}^{-1}$  e  $dr$  de 0,65 entre  
 305 a malha aninhada e a série medida, indicando que o padrão de circulação da componente transversal  
 306 não foi reproduzido tão bem quanto a componente longitudinal quando comparado aos dados medidos.  
 307 Todavia, a magnitude da componente  $v$  foi uma ordem de grandeza menor do que a circulação  
 308 provocada pelas correntes de enchente e vazante.

309 O padrão de oscilação da salinidade foi bem representado nas duas situações (geral e aninhada),  
 310 com erro médio absoluto de 0,15 para a malha geral e 0,31 para a malha aninhada, quando comparado  
 311 aos dados medidos. O índice de concordância foi superior a 0,69, indicando que há boa concordância  
 312 entre os dados medidos e os modelados.

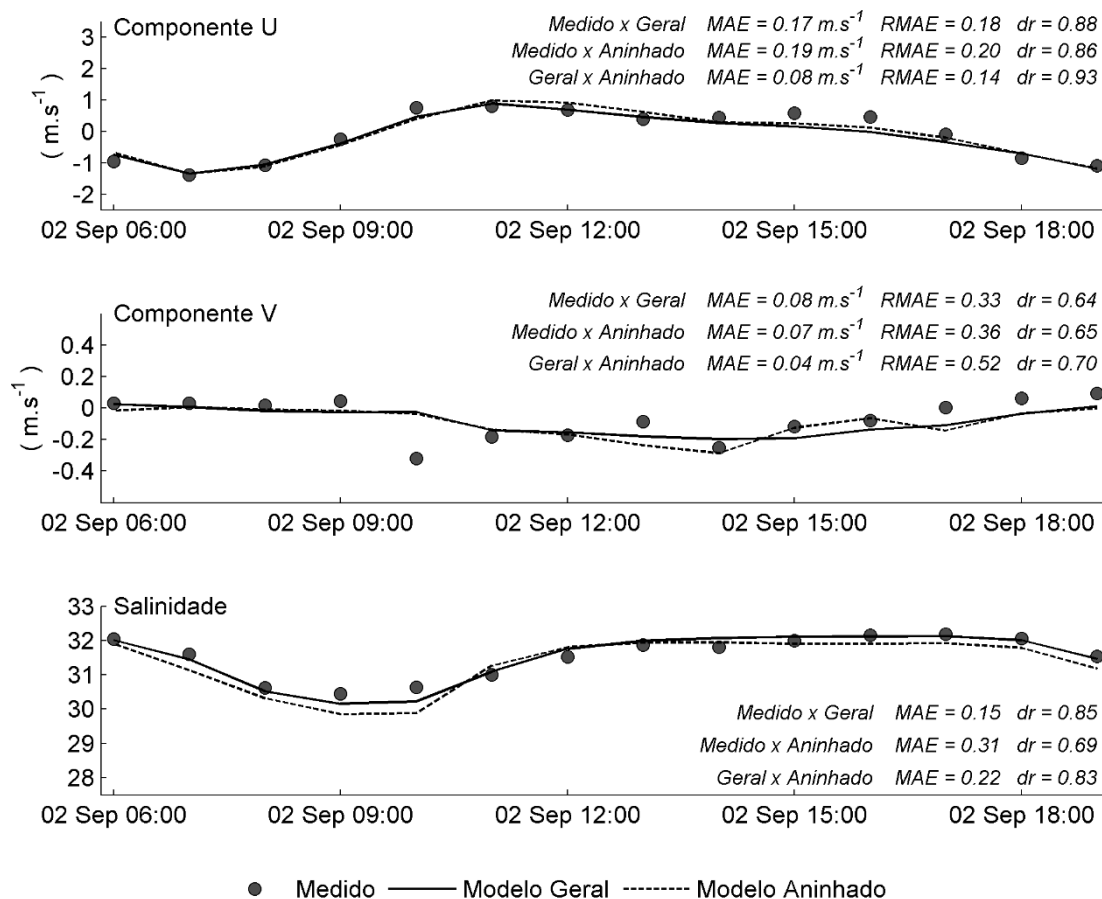


Figura 5 - Comparação das componentes  $u$  e  $v$  orientadas longitudinal e transversalmente, respectivamente, em relação ao canal navegável, e da salinidade entre os dados medidos em perfilagens de S4 e modelados para as duas malhas para meio ciclo de maré de sizígia. Os valores medidos representam médias do perfil vertical, enquanto os valores modelados representam médias ponderadas das camadas verticais. Valores negativos da componente  $u$  indicam correntes de maré vazante.

313

### 314 Recortes temporais

315 No cenário de estofo de preamar (A), a elevação do nível do mar foi de 0,71 m acima do nível  
 316 médio e a velocidade do fluxo foi de 0,13 m.s<sup>-1</sup> (Figura 6). No cenário de velocidade máxima de  
 317 vazante (B), a oscilação do nível do mar foi de -0,45 m e a velocidade do fluxo foi de -1,51 m.s<sup>-1</sup> no

318 sentido estuário afora. O cenário de estofo de baixa-mar (C) foi caracterizado por uma elevação do  
 319 nível do mar de  $-0,86$  m e velocidade do fluxo de  $-0,02$  m.s<sup>-1</sup>. No cenário de velocidade máxima de  
 320 enchente (D), a elevação do nível do mar foi de  $-0,37$  m e a velocidade do fluxo foi de  $0,88$  m.s<sup>-1</sup> no  
 321 sentido estuário adentro. Considerando as cinco estações virtuais de monitoramento localizadas no  
 322 centro do canal navegável, a profundidade média na preamar foi de  $15,89$  m, enquanto que na baixa-  
 323 mar foi de  $14,38$  m, resultando em uma diferença de  $1,51$  m na coluna da água entre o fundo do campo  
 324 de pressão e o fundo do canal entre os cenários de preamar e baixa-mar (Tabela 5). Além disso, ocorreu  
 325 uma assimetria de intensidade de correntes entre os cenários nos momentos de maré vazante e e  
 326 enchente, na qual as correntes de vazante foram superiores às de enchente, porém com menor duração.

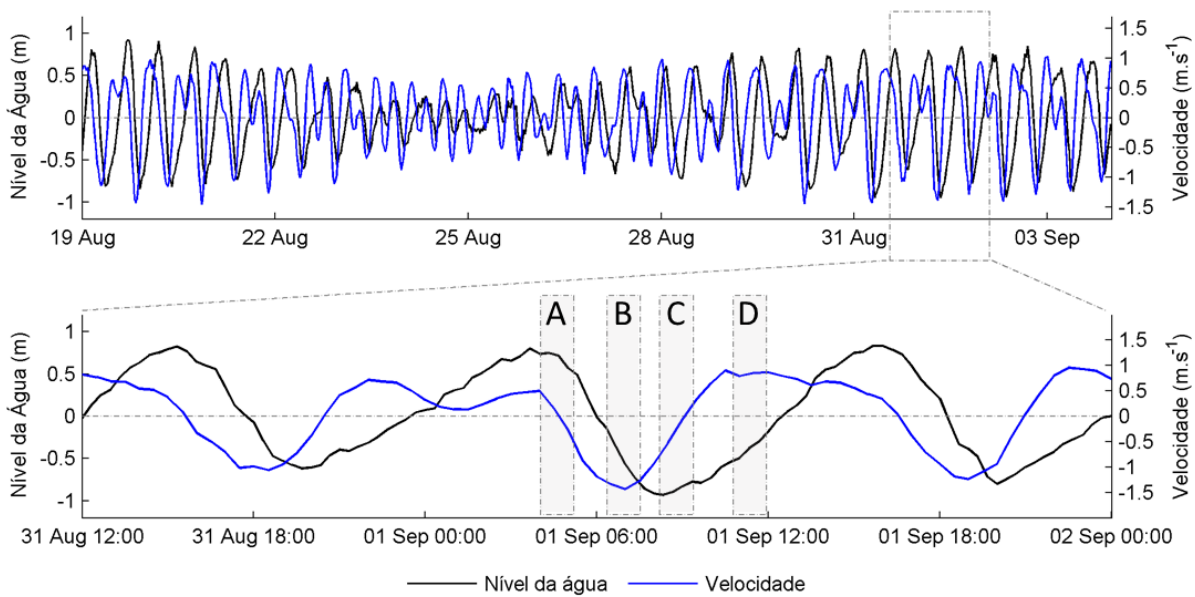


Figura 6 – Oscilação do nível do mar e velocidade da componente  $u$  no centro do canal navegável para todo o período de simulação do modelo aninhado. Em destaque, o período no qual foram selecionados os momentos de maré para a realização dos estudos de caso (A, B, C e D). Valores negativos da componente  $u$  indicam correntes de vazante.

327

Tabela 5 – Características dos momentos de maré escolhidos para a realização dos estudos de caso. Valores negativos de velocidade indicam correntes de vazante.

Letra	Momento de maré	Profundidade do canal (m)	Velocidade do fluxo (m.s <sup>-1</sup> )
A	Preamar	15,89	0,133
B	Vazante	14,66	-1,515
C	Baixa-mar	14,38	-0,029
D	Enchente	14,88	0,887

328

## 329 **Alterações hidrodinâmicas**

330 As alterações hidrodinâmicas durante a passagem dos campos de pressão, com dimensões dos  
331 navios do tipo porta-contêiner e graneleiro, nos momentos de preamar e baixa-mar foram semelhantes,  
332 com picos de velocidade no sentido de navegação na proa e popa devido ao deslocamento de água e  
333 ao preenchimento do vazio deixado pelo campo de pressão, respectivamente, e formação de fluxos de  
334 retorno fluindo em sentido contrário ao de navegação na coluna da água imediatamente abaixo da  
335 embarcação.

336 A passagem do campo de pressão típico de um navio porta-contêiner provocou correntes de  
337  $0,95 \text{ m.s}^{-1}$  próximo à proa e popa na preamar, e de  $1,01 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-mar (Figura 7). Na coluna da  
338 água entre o campo de pressão e o fundo do canal, a direção da corrente foi sentido popa, atingindo -  
339  $0,78 \text{ m.s}^{-1}$  na preamar e  $-1,13 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-mar (Tabela 6). Nos estudos de caso com navios  
340 graneleiros, esses valores foram menores, com correntes na proa e popa de  $0,79 \text{ m.s}^{-1}$  na preamar e  
341  $0,82 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-mar, e fluxos de retorno atingindo  $-0,63 \text{ m.s}^{-1}$  na preamar e  $-0,90 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-  
342 mar. Nos cenários com navios porta-contêiner, as correntes ao largo da linha de navegação  
343 acompanharam a depressão formada pelo deslocamento do campo de pressão, fluindo inicialmente  
344 para longe e depois no sentido popa. A 40 m da linha de navegação as correntes atingiram  $-0,43 \text{ m.s}^{-1}$   
345 na preamar e  $-0,62 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-mar, reduzindo progressivamente a velocidade conforme aumentava  
346 a distância da linha de navegação. Nos cenários com navios graneleiros, o mesmo padrão foi  
347 observado, com velocidades de  $-0,30 \text{ m.s}^{-1}$  na preamar e  $-0,45 \text{ m.s}^{-1}$  na baixa-mar a 40 m da linha de  
348 navegação. Considerando apenas os cenários de estofos de maré, a maior ondulação foi observada pelo  
349 deslocamento do campo de pressão com dimensões de um navio porta-contêiner durante a baixa-mar.  
350 Nesse cenário, a ondulação atingiu altura máxima de 0,20 m na crista e mínima de -0,48 m na cava a  
351 40 m da linha de navegação. A 120 m de distância esses valores caíram para 0,05 m na crista e -0,26  
352 m na cava.

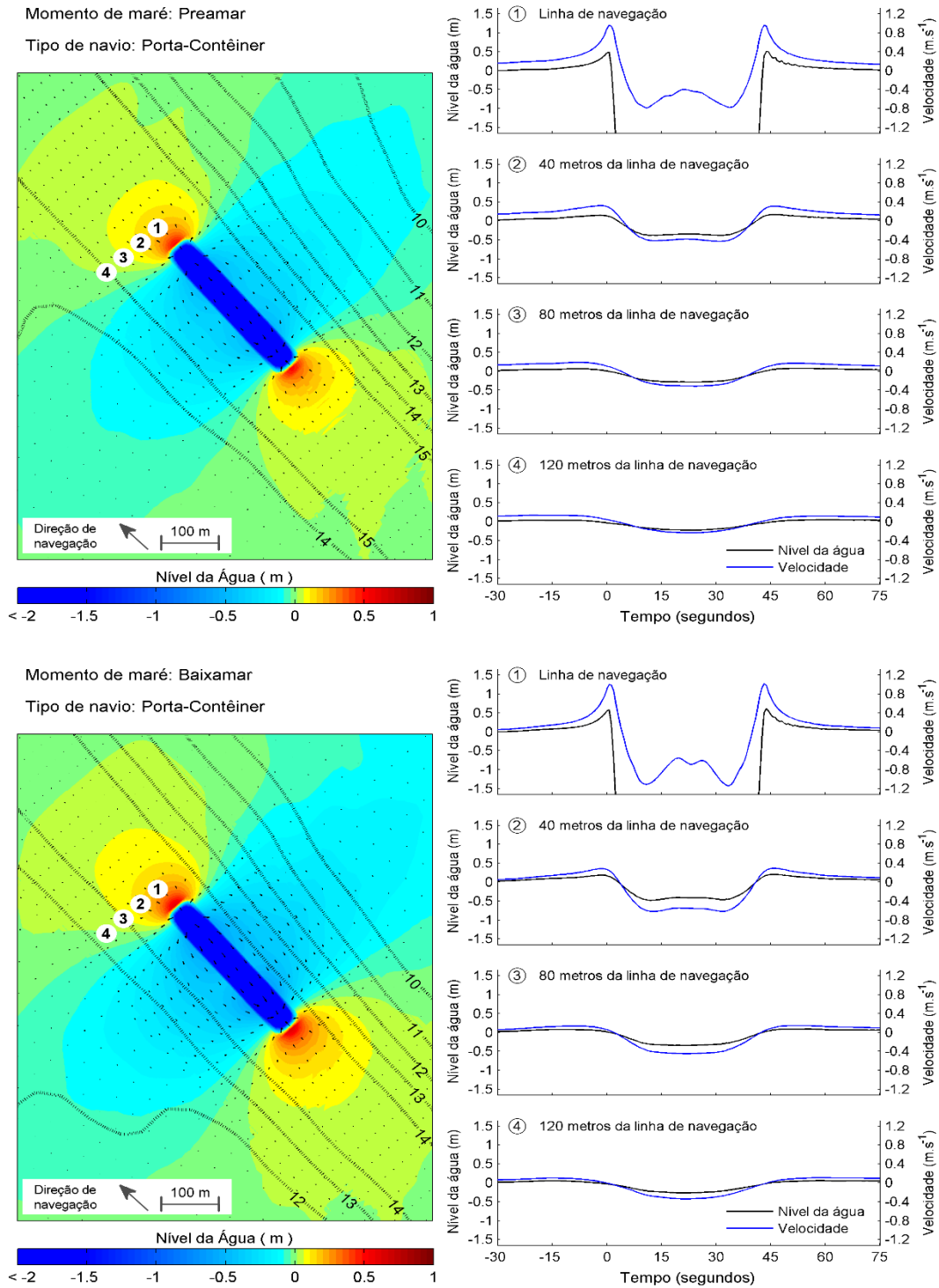


Figura 7 - Variações no nível da água e na velocidade e direção das correntes durante a passagem do campo de pressão, com dimensões do navio porta-contêiner, entrando no estuário nos momentos de preamar e baixa-mar. Os pontos 1, 2, 3 e 4 indicam as estações virtuais de monitoramento, distantes 0, 40, 80 e 120 m da linha de navegação. Valores negativos de velocidade indicam fluxos contrários à direção de navegação. As linhas pontilhadas, na figura da esquerda, indicam as isolinhas de profundidade.

354 A interação entre o deslocamento dos campos de pressão, representando navios porta-contêiner  
 355 e graneleiros estuário adentro, e a circulação natural no momento de maré enchente provocou os  
 356 mesmos picos de velocidade na proa e popa vistos nos cenários de preamar e baixa-mar. Entretanto,  
 357 não foram observados fluxos de retorno na coluna da água abaixo dos navios, apenas o  
 358 enfraquecimento das correntes que continuaram fluindo estuário adentro. A circulação natural nos  
 359 cenários de enchente apresentou velocidade de  $0,88 \text{ m.s}^{-1}$ . Durante a passagem do campo de pressão  
 360 do tipo porta-contêiner, ocorreram picos de velocidade de  $1,68 \text{ m.s}^{-1}$  na proa e popa. Abaixo e no  
 361 entorno do campo de pressão, a velocidade das correntes perdeu intensidade, atingindo  $0,07 \text{ m.s}^{-1}$  na  
 362 linha de navegação,  $0,40 \text{ m.s}^{-1}$  a 40 m da linha de navegação,  $0,51 \text{ m.s}^{-1}$  a 80 m, e  $0,59 \text{ m.s}^{-1}$  a 120 m  
 363 (Figura 8). O mesmo padrão foi observado na passagem do campo de pressão do tipo graneleiro, com  
 364 ainda menor influência na circulação natural, atingindo velocidade de  $0,21 \text{ m.s}^{-1}$  na linha de navegação  
 365 e  $0,68$  a 120 m de distância.

366

Tabela 6 – Sumário da velocidade do fluxo na proa e popa ( $V_{proa}$ , em  $\text{m.s}^{-1}$ ), dos fluxos de retorno abaixo e no entorno do campo de pressão ( $V_{ret}$ , em  $\text{m.s}^{-1}$ ) e da altura da ondulação ( $H$ , em metros) registrados durante a passagem do campo de pressão por uma das séries de estações virtuais de monitoramento. Valores negativos de velocidade indicam fluxo em sentido contrário à navegação.

Momento de maré	Tipo de navio	0 metros		40 metros		80 metros		120 metros	
		$V_{proa}$	$V_{ret}$	$V_{ret}$	$H$	$V_{ret}$	$H$	$V_{ret}$	$H$
Preamar	Graneleiro	0,79	-0,63	-0,30	0,38	-0,20	0,21	-0,12	0,12
	Porta-contêiner	0,95	-0,78	-0,43	0,54	-0,31	0,32	-0,23	0,21
Vazante	Graneleiro	-0,31	-3,02	-2,23	0,94	-1,99	0,52	-1,85	0,34
	Porta-contêiner	0,23	-3,80	-2,65	1,49	-2,28	0,87	-2,11	0,62
Baixa-mar	Graneleiro	0,82	-0,90	-0,45	0,46	-0,30	0,25	-0,20	0,15
	Porta-contêiner	1,01	-1,13	-0,62	0,67	-0,45	0,39	-0,34	0,26
Enchente	Graneleiro	1,52	0,21	0,51	0,31	0,61	0,17	0,68	0,10
	Porta-contêiner	1,68	0,07	0,40	0,45	0,51	0,27	0,59	0,17

367

368 O empilhamento de água na proa e popa, e o rebaixamento no entorno do campo de pressão  
 369 nos cenários de maré enchente, foram inferiores aos dos demais cenários. Na proa e popa, o nível da  
 370 água atingiu máximos de 0,42 m para navios porta-contêiner e 0,35 m para navios graneleiros. A 40  
 371 m da linha de navegação a oscilação no nível da água variou entre 0,15 m na crista e -0,29 m na cava  
 372 para navios porta-contêiner e entre 0,10 m na crista e -0,21 m na cava para navios graneleiros, enquanto  
 373 a 120 m, foram registrados valores entre 0,06 m e -0,16 m para navios porta-contêiner e entre 0,04 m  
 374 e -0,09 m para navios graneleiros.

375

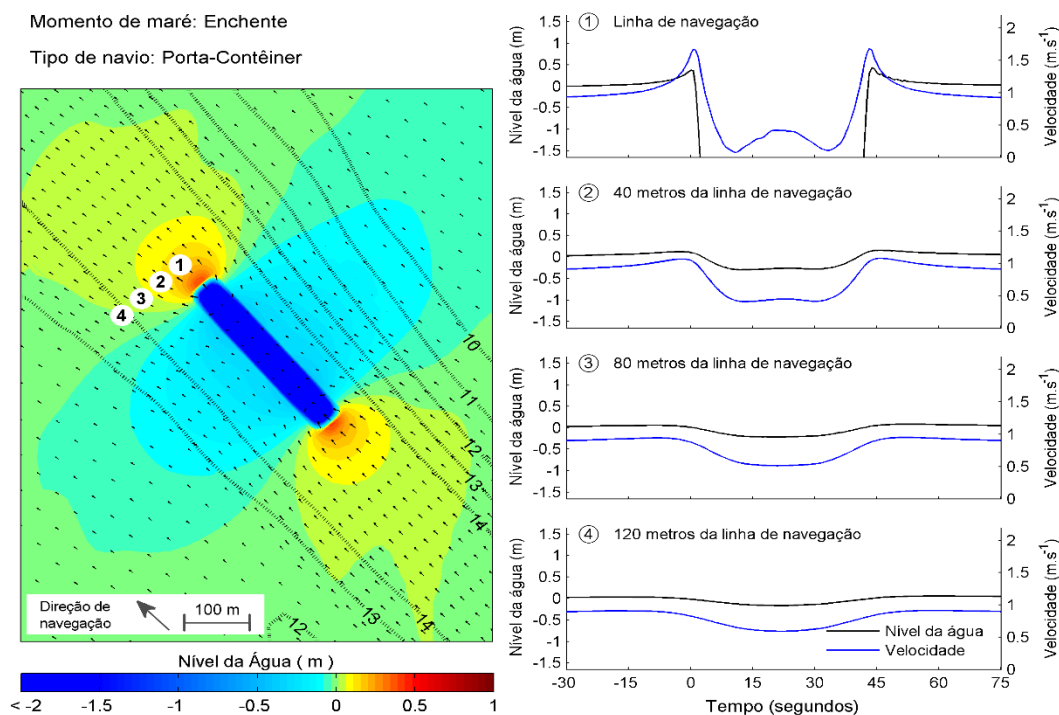


Figura 8 - Variações no nível da água e na velocidade e direção das correntes durante a passagem do campo de pressão, com dimensões do navio porta-contêiner, entrando no estuário no momento de maré enchente. Os pontos 1, 2, 3 e 4 indicam as estações virtuais de monitoramento, distantes 0, 40, 80 e 120 m da linha de navegação. Valores negativos de velocidade indicam fluxos contrários à direção de navegação. As linhas pontilhadas na figura da esquerda indicam as isolinhas de profundidade.

377

378 Durante a vazante, as correntes provocadas pela interação entre o deslocamento dos campos de  
 379 pressão e a circulação ambiente foram mais intensas (Figura 9). As correntes de maré apresentaram  
 380 velocidade de  $-1,51 \text{ m.s}^{-1}$  no sentido contrário ao de navegação. Os fluxos de retorno abaixo dos navios  
 381 apresentaram aumento na velocidade sob a proa e popa, e uma zona de redução do fluxo na porção  
 382 central do navio. A passagem do campo de pressão com dimensões do navio porta-contêiner provocou  
 383 a formação de fluxos de retorno com velocidade média de  $-2,35 \text{ m.s}^{-1}$  ao longo da linha de navegação.  
 384 No entorno do campo de pressão, a velocidade média das correntes continuou intensa, atingindo  $-2,26$   
 385  $\text{m.s}^{-1}$  a 40 m da linha de navegação,  $-2,00 \text{ m.s}^{-1}$  a 80 m, e  $-1,81 \text{ m.s}^{-1}$  a 120 m. Nos cenários com navios  
 386 graneleiros o mesmo padrão foi observado, com velocidades médias de  $-2,24 \text{ m.s}^{-1}$  na coluna da água  
 387 abaixo do campo de pressão,  $-2,03 \text{ m.s}^{-1}$  a 40 m da linha de navegação,  $-1,78 \text{ m.s}^{-1}$  a 80 m, e  $-1,62 \text{ m.s}^{-1}$   
 388 a 120 m.

389 O empilhamento de água na proa e popa, e o rebaixamento no entorno do campo de pressão  
 390 foram mais intensos na vazante do que nos demais momentos de maré analisados. Na proa e popa, o  
 391 nível da água atingiu máximos de 0,83 m no cenário com navio porta-contêiner e 0,78 m com navio  
 392 graneleiro. A 40 m da linha de navegação a ondulação apresentou valores entre 0,35 m na crista e -  
 393 1,15 m na cava para navios porta-contêiner e entre 0,20 m na crista e -0,74 m na cava para navios  
 394 graneleiros, enquanto que a 120 m, foram registrados valores entre 0,13 m e -0,65 m para navios porta-  
 395 contêiner e entre 0,03 m e -0,40 m para navios graneleiros.

396

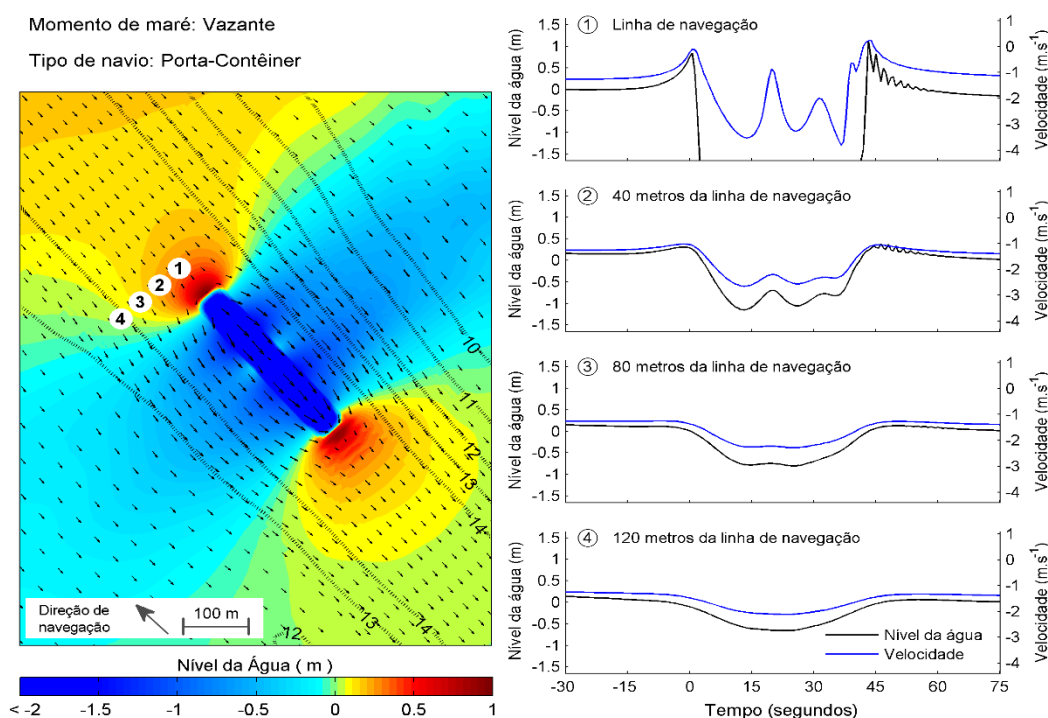


Figura 9 - Variações no nível da água e na velocidade e direção das correntes durante a passagem do campo de pressão, com dimensões do navio porta-contêiner, entrando no estuário no momento de maré vazante. Os pontos 1, 2, 3 e 4 indicam as estações virtuais de monitoramento, distantes 0, 40, 80 e 120 m da linha de navegação. Valores negativos de velocidade indicam fluxos contrários à direção de navegação. As linhas pontilhadas na figura da esquerda indicam as isolinhas de profundidade.

### 397 **Comparação com as correntes calculadas**

398 As velocidades médias dos fluxos de retorno dos cenários analisados e as velocidades  
 399 calculadas pela equação de Hochstein e Adams (1989) (Equação 10) para a mesma posição das  
 400 estações virtuais de monitoramento são apresentadas na Figura 10 e Tabela 7. A velocidade de  
 401 deslocamento do campo de pressão foi inferior à velocidade crítica de navegação em todos os casos

402 analisados. No cenário de preamar, a  $V_{cr}$  foi de 10,24  $m.s^{-1}$ , enquanto que no cenário de baixa-mar a  
 403  $V_{cr}$  foi de 9,74  $m.s^{-1}$ . A velocidade média dos fluxos de retorno modelados foi similar aos valores  
 404 calculados para a mesma distância da linha de navegação, com coeficiente de correlação de 0,97 entre  
 405 as velocidades modeladas e calculadas. As maiores diferenças ocorreram na linha de navegação e a 20  
 406 m de distância, que corresponde à borda do campo de pressão, onde os valores calculados pela equação  
 407 de Hochstein e Adams (1989) foram inferiores aos do modelo. Nas estações distantes mais que 60 m  
 408 da linha de navegação, os valores calculados foram superiores aos do modelo.

409

Tabela 7 – Fluxos de retorno modelados e calculados para os cenários de preamar e baixa-mar. Os valores estão apresentados como magnitude.  $V_{max}$  = Velocidade máxima observada no modelo ( $m.s^{-1}$ ),  $V_{med}$  = Velocidade média observada no modelo ( $m.s^{-1}$ ),  $Vr(y)$  = Velocidade do fluxo de retorno calculada pela equação de Hochstein e Adams (1989) na mesma distância indicada ( $m.s^{-1}$ ).

Momento de maré	Tipo de navio	Distância da linha de navegação (m)	$V_{max}$	$V_{med}$	$Vr(y)$
Preamar	Porta-contêiner	0	1,029	0,607	0,665
		40	0,640	0,475	0,520
		80	0,424	0,316	0,406
		120	0,337	0,240	0,317
	Graneleiro	0	0,828	0,523	0,548
		40	0,449	0,349	0,404
		80	0,292	0,214	0,298
		120	0,239	0,163	0,220
Baixa-mar	Porta-contêiner	0	1,178	0,771	0,736
		40	0,747	0,623	0,575
		80	0,523	0,429	0,449
		120	0,408	0,322	0,351
	Graneleiro	0	0,926	0,657	0,606
		40	0,534	0,459	0,447
		80	0,359	0,288	0,330
		120	0,259	0,200	0,243

410

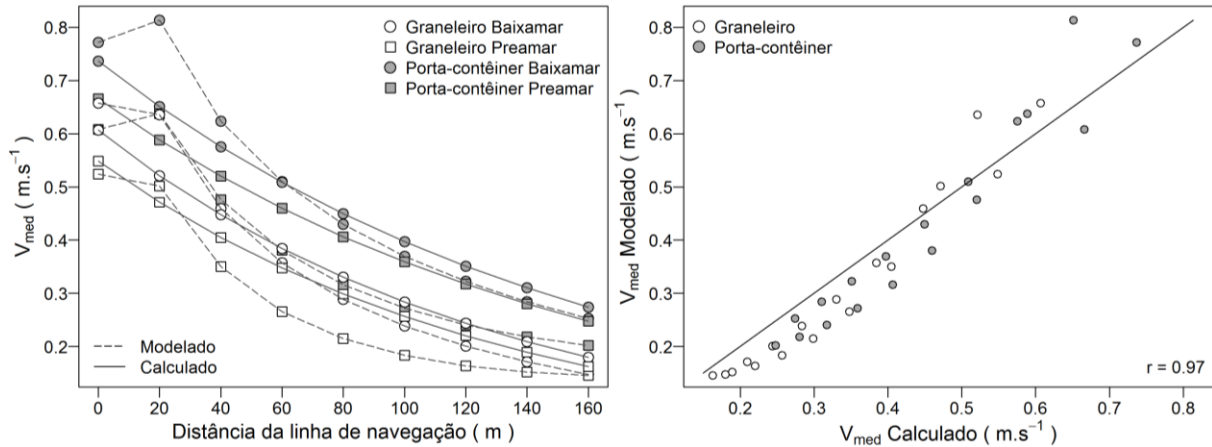


Figura 10 – Comparação dos perfis de fluxos de retorno entre os dados modelados e calculados pela equação de Hochstein e Adams (1989). Os valores de velocidade estão apresentados como magnitude.

411

#### 412 **Implicações para o transporte de sedimentos**

413 A passagem das embarcações provocou picos de velocidade superiores aos observados nos  
 414 momentos de maré enchente ou vazante sem a presença dos navios. Os máximos de velocidade na  
 415 linha de navegação nos cenários de preamar e baixa-mar com a passagem de navios se igualaram aos  
 416 observados nos momentos de maré enchente sem a presença dos navios. Além disso, os picos de  
 417 velocidade a até 120 metros da linha de navegação nos cenários de enchente com a passagem de navios  
 418 foram mais intensos do que os observados nos momentos de maré enchente sem a presença dos navios  
 419 (Figura 11). Entretanto, a comparação das velocidades médias indicou que a passagem dos navios nos  
 420 momentos de maré enchente reduziu em  $0,22 \text{ m.s}^{-1}$  (25,4%) a velocidade do fluxo na linha de  
 421 navegação. A velocidade média nos cenários de preamar e baixa-mar com a presença dos navios foi  
 422 superior aos correlatos sem navio, porém não alcançaram as velocidades naturalmente encontradas nos  
 423 momentos de maré enchente ou vazante.

424 Somente os cenários de maré vazante com a presença de navios, tanto porta-contêiner quanto  
 425 graneleiros, apresentaram velocidades médias superiores às observadas naturalmente pelas correntes  
 426 de maré. Nesses cenários, a área de influência da perturbação provocada pela passagem dos navios  
 427 ultrapassou os limites do canal navegável. Na linha de navegação, a velocidade média nos momentos  
 428 da passagem dos campos de pressão do tipo graneleiro e porta-contêiner foi  $0,49 \text{ m.s}^{-1}$  (32,4%) e  $0,63$   
 429  $\text{m.s}^{-1}$  (41,6%), respectivamente, superior à velocidade da corrente de vazante (Tabela 8).

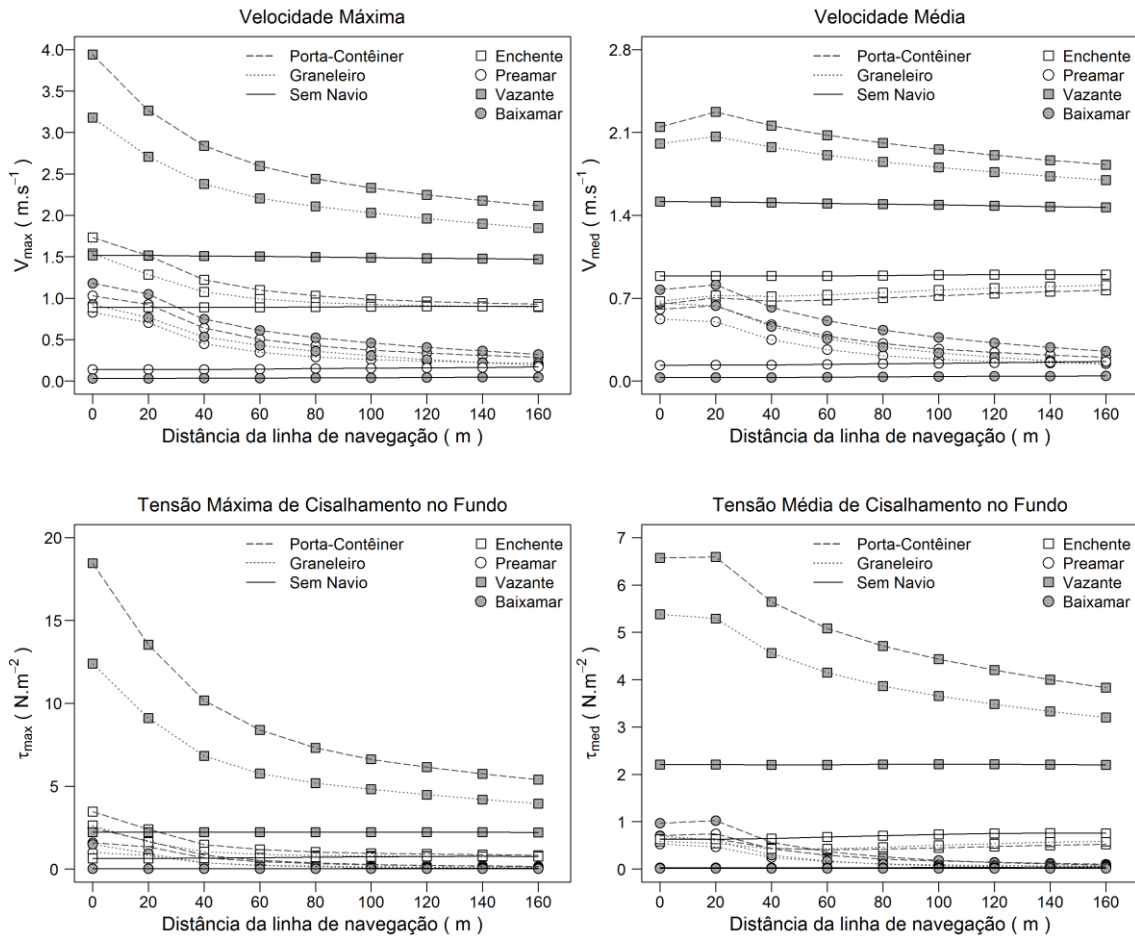


Figura 11 - Valores máximos e médios da velocidade do fluxo e da tensão de cisalhamento no fundo em relação à distância da linha de navegação nos cenários analisados. As médias foram calculadas nos instantes da passagem do campo de pressão em cada estação de monitoramento. A velocidade está representada como magnitude, sem direção.

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

O aumento na velocidade média das correntes nos cenários com navios intensificou a tensão de cisalhamento no fundo ao longo da linha de navegação e nas bordas do canal navegável. As únicas exceções foram os estudos de caso de maré enchente com navios, nos quais o enfraquecimento da velocidade média das correntes provocou a redução em  $0,19 N.m^{-2}$  (26,9%) da tensão média de cisalhamento no fundo, embora valores elevados tenham ocorrido na proa e popa. No cenário de maré vazante com navio porta-contêiner, a tensão de cisalhamento média no fundo foi de  $6,57 N.m^{-2}$  na linha de navegação, apresentando uma tendência linear de redução em função da distância, sendo registrados  $3,82 N.m^{-2}$  a 160 m da linha de navegação. No mesmo momento de maré, porém com navio graneleiro, os valores foram de  $5,38 N.m^{-2}$  na linha de navegação e  $3,20 N.m^{-2}$  a 160 m. Nos cenários sem navios, o maior valor médio foi na maré vazante, com  $2,20 N.m^{-2}$ . Os maiores picos de tensão de

441 cisalhamento no fundo foram de 18,46 N.m<sup>-2</sup> no cenário de vazante com navio porta-contêiner, seguido  
 442 de 12,39 N.m<sup>-2</sup> no cenário de vazante com navio graneleiro.

Tabela 8 - Valores máximos e médios da velocidade do fluxo ( $V_{max}$  e  $V_{med}$ , em m.s<sup>-1</sup>) e da tensão de cisalhamento no fundo ( $\tau_{max}$  e  $\tau_{med}$ , em N.m<sup>-2</sup>) registrados pelas estações virtuais de monitoramento localizadas na linha de navegação. A velocidade do fluxo está representada apenas como magnitude, sem direção.

Momento de maré	Tipo de navio	UKC*	$V_{max}$	$V_{med}$	$\tau_{max}$	$\tau_{med}$
Preamar	Sem navio	15,89	0,138	0,134	0,026	0,025
	Graneleiro	7,75	0,829	0,524	1,000	0,530
	Porta-contêiner	6,19	1,030	0,608	1,594	0,707
Vazante	Sem navio	14,66	1,518	1,515	2,229	2,209
	Graneleiro	6,52	3,180	2,007	12,394	5,380
	Porta-contêiner	4,96	3,941	2,147	18,460	6,575
Baixa-mar	Sem navio	14,38	0,032	0,029	0,013	0,011
	Graneleiro	6,24	0,926	0,658	1,498	0,698
	Porta-contêiner	4,68	1,179	0,772	2,474	0,966
Enchente	Sem navio	14,88	0,888	0,887	0,640	0,628
	Graneleiro	6,74	1,541	0,675	2,633	0,586
	Porta-contêiner	5,18	1,732	0,647	3,456	0,634

\* Under Keel Clearance, altura livre sob a quilha do navio, nos cenários sem navios corresponde à profundidade total da coluna da água.

443

444 As maiores taxas de transporte em suspensão ocorreram nos cenários de vazante, onde o estudo  
 445 de caso com navio porta-contêiner apresentou taxa superior ( $11,35 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ao estudo de caso  
 446 com navio graneleiro ( $5,13 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) na linha de navegação (Tabela 9). Nas estações ao largo  
 447 da linha de navegação, o cenário com navio porta-contêiner apresentou máximos de transporte por  
 448 suspensão de  $6,22 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 20 m e  $1,85 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 160 m da linha de navegação,  
 449 enquanto o cenário com navio graneleiro apresentou valores inferiores, com  $3,62 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 20  
 450 m e  $1,27 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 160 m (Figura 12).

451 Analisando as taxas médias de transporte em suspensão no cenário de vazante com navio porta-  
 452 contêiner, o maior valor registrado foi na linha de navegação ( $2,64 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) com tendência  
 453 linear de redução em função da distância, sendo registrado  $1,21 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 160 m. No cenário  
 454 de vazante com navio graneleiros, as taxas médias de transporte em suspensão na linha de navegação  
 455 e a 20 m de distância foram similares ( $1,91 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Nos cenários sem navios, a maior taxa  
 456 média de transporte em suspensão foi na maré vazante, com  $0,72 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  seguido da maré  
 457 enchente, com  $0,01 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . As baixas velocidades observadas nos cenários de baixa-mar e  
 458 preamar sem a passagem de navios não foram suficientes para suspender sedimentos.

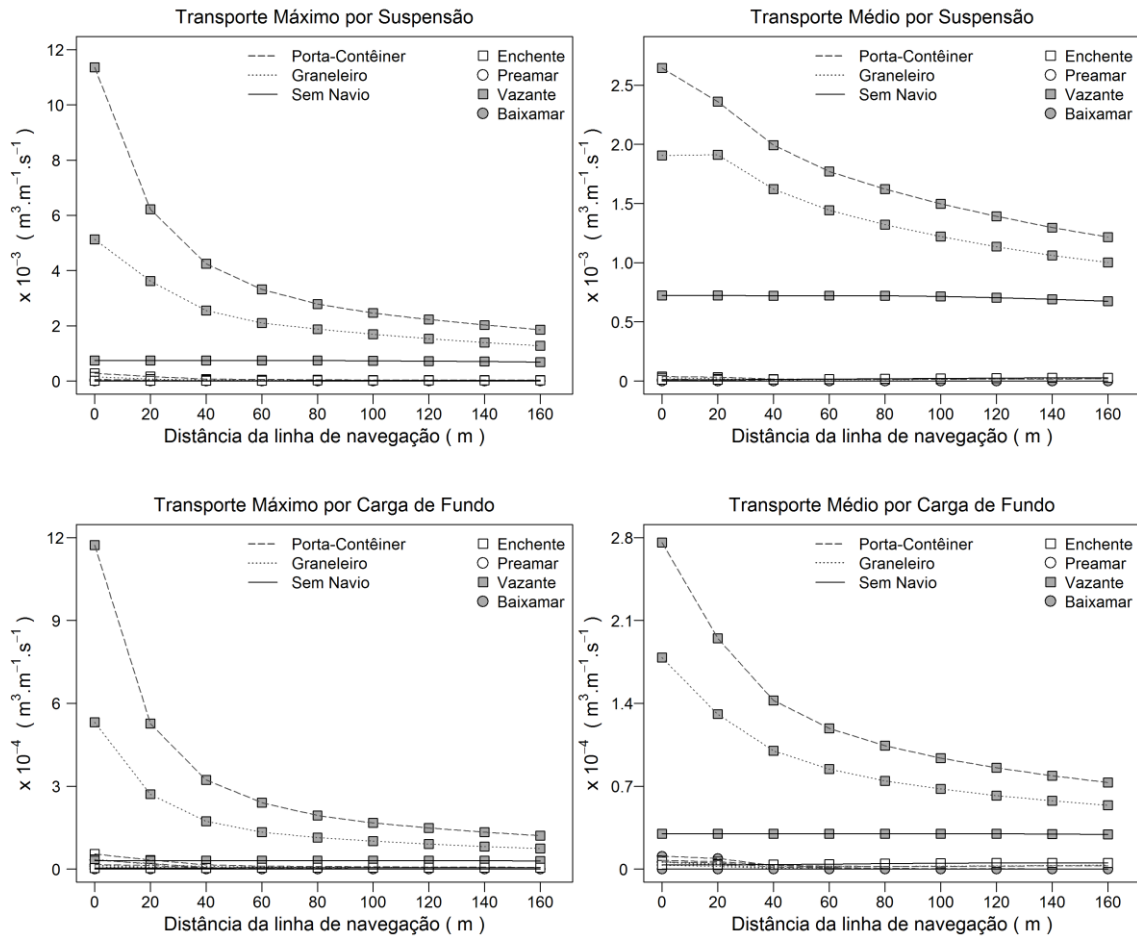


Figura 12 - Valores máximos e médios do transporte de sedimentos por carga de fundo e por suspensão em relação à distância da linha de navegação nos cenários analisados. As médias foram calculadas nos instantes da passagem do campo de pressão em cada estação de monitoramento.

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

As taxas de transporte de sedimentos por carga de fundo foram, em geral, uma ordem de grandeza menor do que as observadas no transporte em suspensão. As maiores taxas ocorreram na linha de navegação nos cenários de maré vazante com a presença de navios, dos quais o cenário com navio porta-contêiner apresentou máximos de  $11,73 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  contra  $5,31 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  no cenário com navio graneleiro. Na média, a taxa de transporte por carga de fundo no cenário de vazante com navio porta-contêiner foi de  $2,75 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  na linha de navegação, reduzindo para  $1,43 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 40 m e  $0,73 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 160 m. O cenário de vazante com navio graneleiro seguiu o mesmo padrão, com  $1,78 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  na linha de navegação, reduzindo para  $1,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 40 m e  $0,53 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a 160 m. Nos cenários sem navios, a maior taxa média de transporte por carga de fundo ocorreu na maré vazante, com  $0,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  seguido da maré enchente, com  $0,03 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Como observado no transporte em suspensão, as baixas velocidades nos cenários de baixa-mar e preamar sem a passagem de navios não foram suficientes para transportar sedimentos.

Tabela 9 – Valores máximos e médios do transporte de sedimentos por carga de fundo ( $CF_{max}$  e  $CF_{med}$ , em  $\times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e por suspensão ( $S_{max}$  e  $S_{med}$ , em  $\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) na linha de navegação.

Momento de maré	Tipo de navio	$CF_{max}$	$CF_{med}$	$S_{max}$	$S_{med}$
Preamar	Sem navio	-	-	-	-
	Graneleiro	0,077	0,033	0,008	0,003
	Porta-contêiner	0,167	0,059	0,025	0,006
Vazante	Sem navio	0,302	0,298	0,744	0,723
	Graneleiro	5,314	1,785	5,132	1,907
	Porta-contêiner	11,736	2,759	11,360	2,644
Baixa-mar	Sem navio	-	-	-	-
	Graneleiro	0,135	0,055	0,019	0,006
	Porta-contêiner	0,325	0,108	0,060	0,013
Enchente	Sem navio	0,037	0,036	0,013	0,011
	Graneleiro	0,347	0,061	0,155	0,029
	Porta-contêiner	0,549	0,074	0,285	0,039

472

473 A variação na camada sedimentar dos cenários de navios porta-contêiner nos quatro momentos  
474 de maré é apresentada na Figura 13. Dos resultados dos cenários com navios, subtraiu-se a variação  
475 natural na camada sedimentar dos cenários sem a presença de navios, de forma a restar apenas a  
476 perturbação provocada pela passagem da embarcação. Nos cenários de preamar e baixa-mar com navio  
477 porta-contêiner, observou-se uma zona de erosão de sedimentos imediatamente abaixo do campo de  
478 pressão e rápida deposição no entorno. Esse efeito foi mais intenso na baixa-mar do que na preamar;  
479 porém, em ambos os cenários a perturbação provocada pela passagem do navio não ultrapassou os  
480 limites do canal navegável. No cenário de enchente com navio porta-contêiner, ocorreu uma assimetria  
481 no transporte de sedimentos dentro do canal navegável, com a formação de zonas de erosão no lado  
482 direito do canal (orientado em relação à direção de navegação), onde a declividade da borda do canal  
483 navegável é maior, e deposição no lado esquerdo, que apresenta menor declividade. No cenário de  
484 vazante com navio porta-contêiner, a passagem do campo de pressão deixou um rastro de erosão na  
485 linha de navegação. Além disso as zonas de erosão ultrapassaram os limites do canal navegável,  
486 impactando principalmente o lado direito do canal, devido à declividade mais acentuada do fundo. As  
487 zonas de deposição no fundo do canal navegável, após a passagem do campo de pressão, indicam que  
488 este é o destino do sedimento remobilizado no centro e nas bordas.

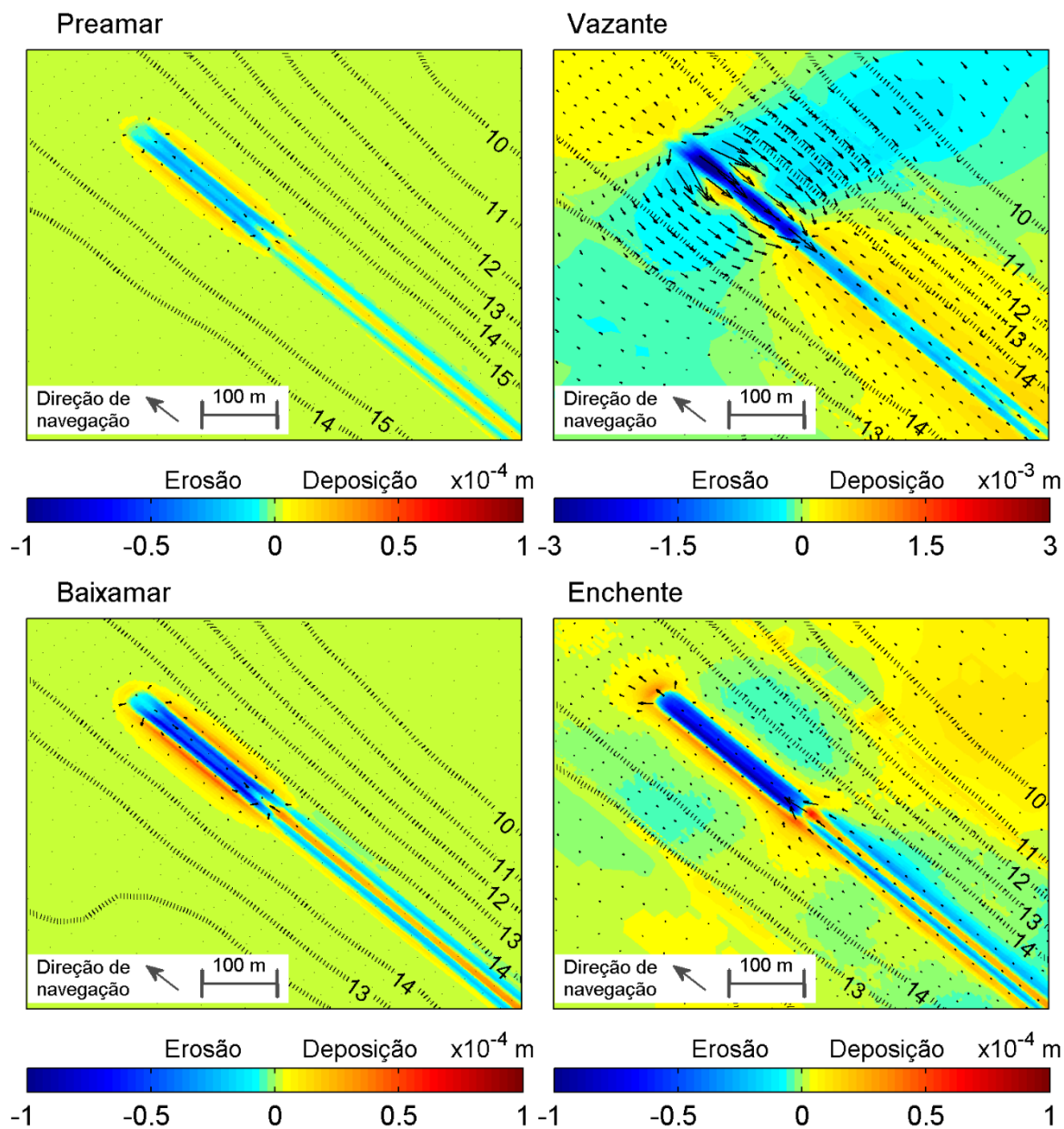


Figura 13 – Variação na altura da camada sedimentar dos cenários de navios porta-contêiner após a remoção da variação natural provocada pelas correntes de maré. Os vetores representam o transporte total de areias finas no momento de passagem do campo de pressão.

489

490

## DISCUSSÃO

491

492

O modelo hidrodinâmico reproduziu com sucesso as condições ambientais da área de estudo.

493

As velocidades das correntes, a amplitude e a assimetria da maré nos recortes temporais selecionados

494 foram condizentes com estudos anteriores na região. Mantovanelli *et al.*, (2004) observaram que  
495 durante a sizígia os períodos de vazante foram 1,6 a 3,6 h mais curtos, com máximos de corrente de  
496 vazante 20 a 40 % mais intensas do que na enchente. O transporte médio de sedimentos por carga de  
497 fundo nos cenários sem a presença de navios foi da mesma ordem de magnitude que o descrito por  
498 Souza (2012) na mesma área de estudo.

499 O deslocamento dos campos de pressão, com dimensões similares às dos navios porta-contêiner  
500 e graneleiros que frequentam os portos de Paranaguá e Antonina, exerceu forças que alteraram o padrão  
501 de circulação do ambiente. As alterações no campo de velocidade e direção das correntes e a depressão  
502 no nível da água, observadas durante a passagem dos navios, são consistentes com o descrito por outros  
503 estudos (Das *et al.*, 2012). À medida que o campo de pressão se moveu, a água da proa foi deslocada  
504 gerando uma zona de alta pressão e fluxo no sentido popa devido ao gradiente de pressão. Ao mesmo  
505 tempo, água fluiu de todas as direções para preencher o vazio criado atrás da popa, intensificando o  
506 fluxo de água abaixo e no entorno do campo de pressão, formando uma zona de alta pressão na popa  
507 devido à convergência dos fluxos. O aumento no campo de velocidades em direção contrária à  
508 navegação produziu um campo de pressão hidrodinâmico no entorno do que seria o casco do navio  
509 similar ao princípio de Bernoulli, onde as energias cinéticas e potencial são balanceadas. A redução na  
510 energia potencial e pressão se manifesta pelo rebaixamento do nível da água nas laterais do navio que,  
511 associado às cristas formadas na proa e popa, apresenta as características de uma onda solitária  
512 negativa (Schroevens *et al.*, 2011), também conhecida como onda de Bernoulli (Gelinas *et al.*, 2013;  
513 Rapaglia *et al.*, 2011).

514 Este trabalho não apresenta comparações entre o resultado das simulações e medições reais dos  
515 efeitos do tráfego de navios na hidrodinâmica na área de estudo. Desta forma, a intensidade das  
516 correntes e oscilações do nível da água apresentados não devem ser tomados como valores absolutos.  
517 Por outro lado, a velocidade dos fluxos de retorno calculada pela equação de Hochstein e Adams  
518 (1989) foi similar à observada no modelo, embora tenha subestimado os valores próximos ao campo  
519 de pressão. A maior parte das soluções e modelos empíricos desenvolvidos para prever os efeitos do  
520 tráfego de embarcações são baseados em ambientes de geometria simplificada, sendo mais adequados  
521 para hidrovias e canais restritos (Das *et al.*, 2012). Em geral, essas equações não consideram as  
522 variações na batimetria do canal navegável, o que pode influenciar na velocidade das correntes  
523 próximas aos navios.

524 Os cenários de preamar e baixa-mar permitiram estudar a importância da diferença da  
525 profundidade da coluna da água nas alterações hidrodinâmicas provocadas pela passagem de navios  
526 com diferentes dimensões. Nesses dois momentos de maré, a passagem dos campos de pressão

527 provocou fluxos de retorno e rebaixamento do nível da água no entorno, com maior intensidade nos  
528 cenários de baixa-mar sobre a preamar, e com navios porta-contêiner sobre graneleiros. Entretanto, a  
529 velocidade dos fluxos de retorno provocada nos momentos de estofó foi inferior às correntes de maré  
530 enchente ou vazante, representando um acréscimo de energia pouco significativo à remobilização de  
531 sedimentos no canal navegável.

532 A diferença entre os calados dos navios estudados (1,56 m) e a variação da profundidade da  
533 coluna da água entre a preamar e a baixa-mar (1,51 m) foi praticamente a mesma, resultando em um  
534 valor semelhante da altura livre sob a quilha entre os cenários de baixa-mar com navio graneleiro e de  
535 preamar com navio porta-contêiner ( $\approx 6,22$  m). Nesses estudos de caso, as velocidades médias dos  
536 fluxos de retorno na linha de navegação foram similares, indicando que a largura e o comprimento do  
537 navio apresentam menor importância na formação de fluxos de retorno abaixo do casco dos navios.  
538 De acordo com Stolker e Verheij (2006), essas correntes são mais sensíveis à variação da razão entre  
539 a profundidade e o calado das embarcações do que à variação do bloqueio horizontal, i.e., a razão entre  
540 a largura da embarcação e a profundidade local.

541 A direção da circulação natural do ambiente, decorrente dos momentos de marés, provocou  
542 diferentes respostas na intensidade dos fluxos de retorno e no rebaixamento do nível da água no entorno  
543 do campo de pressão. Nos cenários de maré enchente, em que a circulação natural do ambiente fluiu  
544 no mesmo sentido da navegação, as forças exercidas pelo deslocamento dos campos de pressão  
545 representando tanto navios porta-contêiner quanto graneleiros, reduziram a intensidade dos fluxos,  
546 porém sem apresentar correntes em sentido contrário ao da circulação natural. Assim, a velocidade  
547 média do fluxo nos cenários de enchente com a passagem de navios foi inferior à observada no cenário  
548 sem navios. Apesar disso, nesses cenários ocorreram picos de velocidades na proa, popa e na crista da  
549 onda formada no entorno dos navios que, somados à velocidade ambiente no momento de maré  
550 enchente, contribuíram para o transporte de sedimentos por carga de fundo e por suspensão dentro do  
551 canal navegável. Nos cenários de maré vazante, em que a circulação natural do ambiente fluiu no  
552 sentido contrário à navegação, a velocidade dos fluxos de retorno foi somada às correntes de vazante,  
553 aumentando a tensão de cisalhamento no fundo mesmo nas regiões fora do canal navegável. Para os  
554 dois tipos de navios analisados, o total de sedimentos remobilizados foi superior ao observado apenas  
555 pelas correntes de vazante.

556 A formação e a intensidade dos fluxos de retorno dependem de vários fatores como a largura,  
557 profundidade e geomorfologia do canal navegável, além da direção e velocidade do navio e da  
558 circulação ambiente. Stockstill e Berger (2001), estudando os efeitos de ondas e correntes geradas pelo  
559 tráfego de barcaças em hidrovias, descreveram a formação de fluxos de retorno mesmo quando o fluxo

560 natural ocorre no mesmo sentido que a embarcação. Intensas correntes associadas à propagação de  
561 ondas geradas por embarcações foram descritas em diversos estudos (Garel *et al.*, 2008; Rapaglia *et*  
562 *al.*, 2011). Schroevers *et al.* (2011) registraram correntes acima de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , distantes cerca de 400 m  
563 do canal navegável, geradas pela passagem de navios na rota comercial do porto de Antuérpia. Em  
564 geral, os sedimentos remobilizados por essas correntes são transportados para longe da costa sendo,  
565 muitas vezes, depositados no interior do canal navegável (Umgiesser *et al.*, 2004; Gelinias *et al.*, 2013).

566 Em todos os cenários com a presença de navios, ocorreu a formação de zonas de erosão de  
567 sedimentos abaixo do campo de pressão. Nos momentos de preamar e baixa-mar, a velocidade dos  
568 fluxos não foi competente para transportar os sedimentos remobilizados, ocorrendo rápida deposição  
569 de sedimentos no entorno do campo de pressão. Durante a enchente, a passagem do campo de pressão  
570 provocou erosão na margem do canal com maior declividade e deposição na margem com menor  
571 declividade. Nos cenários de maré vazante, os intensos fluxos de retorno foram competentes para  
572 remobilizar sedimentos mesmo fora do canal navegável. A declividade, a circulação ambiente e a  
573 tendência das correntes fluírem em direção à popa provocaram o transporte dos sedimentos  
574 remobilizados para dentro do canal, contribuindo para o assoreamento do canal navegável. Avaliando  
575 levantamentos batimétricos, Cattani e Lamour (2015) consideraram a margem de maior declividade  
576 como uma área crítica de assoreamento do canal navegável. Apesar disso, a passagem do campo de  
577 pressão provocou erosão ao longo da linha de navegação, evidenciando certa capacidade de  
578 manutenção da profundidade do canal (Stolker e Verheij, 2006), principalmente durante a maré  
579 vazante.

580 No Delft3D, os campos de pressão variáveis no tempo e no espaço foram desenvolvidos para  
581 aplicações na simulação de fenômenos meteorológicos, e não para simulações do tráfego de navios.  
582 Além disso, o uso de malhas não estruturadas seria mais apropriado, devido à necessidade de um maior  
583 refinamento da malha numérica ao longo da linha de navegação, como visto em Stockstill e Berger  
584 (2001). Outra possibilidade seria o uso de malhas adaptativas, na qual o refinamento da malha é  
585 ajustado automaticamente em função das condições de fluxo, como descrito por Hammack e Tate  
586 (2008) sobre o modelo Adaptive Hydraulics (ADH). No ADH, a malha é refinada próximo da  
587 embarcação, onde a circulação é mais complexa, enquanto regiões distantes não sofrem refinamento,  
588 reduzindo o esforço computacional. Por outro lado, Zhou *et al.*, (2013) utilizaram os modelos Delft3D  
589 e XBeach para investigar os efeitos da passagem de embarcações próximo à costa, baseados na mesma  
590 metodologia de campo móvel de pressão utilizada no presente estudo, e encontraram boa concordância  
591 entre os resultados dos modelos e os dados observados em protótipos.

592 Alguns efeitos provocados pelo deslocamento de navios reais não puderam ser representados  
593 nas simulações através da utilização do campo móvel de pressão. Dentre os efeitos não representados,  
594 os mais importantes são a turbulência atrás dos navios causada pelos propulsores e o aumento aparente  
595 de calado resultante do afundamento do navio, conhecido como efeito ‘*squat*’, provocado pelo  
596 aumento do campo de velocidade e pela redução da pressão abaixo do casco devido à sucção de água  
597 pelos propulsores do navio (Gourlay, 2006). Essas forças tenderiam a intensificar a velocidade dos  
598 fluxos de retorno e a altura das ondas solitárias. Em uma série de experimentos com modelos em escala,  
599 Rodriguez *et al.*, (2002) constataram que a tensão de cisalhamento junto ao fundo na popa é superior  
600 à proa, em intensidade e em área de efeito, devido à turbulência causada pelos propulsores. Assim, os  
601 resultados apresentados neste estudo podem ser considerados conservadores, uma vez que a velocidade  
602 dos fluxos de retorno e o montante de sedimentos remobilizados tenderiam a ser maiores, caso os  
603 efeitos supracitados fossem contemplados no modelo.

604

605

## CONCLUSÃO

606 A interação entre as diferentes dimensões dos navios, a profundidade da coluna da água e a  
607 circulação natural do ambiente em cada momento de maré resultaram em distintos padrões de  
608 intensidades e direção de fluxos e transporte de sedimentos. A velocidade e direção das correntes de  
609 maré foram determinantes na magnitude da perturbação provocada pela passagem dos navios. Nos  
610 momentos de preamar e baixa-mar, os fluxos de retorno provocados pela passagem dos navios não  
611 foram suficientemente competentes para provocar uma remobilização efetiva de sedimentos, pelo  
612 menos nas condições estabelecidas no modelo. Por outro lado, não foram observados fluxos de retorno  
613 nos cenários em que as correntes de maré fluíram na mesma direção de navegação. Mesmo assim, as  
614 alterações hidrodinâmicas provocaram erosão na margem do canal navegável com declividade mais  
615 acentuada. O cenário com correntes de maré fluindo em sentido oposto à navegação apresentou as  
616 maiores velocidades de fluxos de retorno e remobilização de sedimentos, provocando erosão das  
617 margens e deposição no canal navegável. A modelagem das alterações hidrodinâmicas e morfológicas  
618 provocadas pelo tráfego de navios utilizando campos móveis de pressão no Delft3D se mostrou uma  
619 ferramenta adequada para avaliar os efeitos dessa atividade, que normalmente é difícil de medir no  
620 ambiente. Desta forma, o presente estudo traz informações relevantes para o entendimento da dinâmica  
621 sedimentar e dos processos de assoreamento de canais navegáveis, podendo ser úteis para a área da

622 engenharia costeira na construção de novos canais navegáveis e em projetos de dragagem de  
623 manutenção ou aprofundamento dos mesmos.

624

625

## LITERATURA CITADA

626 Bauer, B.O., Lorang, M.S., Sherman, D.J. 2002. Estimating boat-wake-induced levee erosion using  
627 sediment suspension measurements. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean*  
628 *Engineering*, 128(4), 152-162.

629 Bayraktar Ersan, D., Beji, S. 2013. Numerical simulation of waves generated by a moving pressure  
630 field. *Ocean Engineering*, 59(1), 231-239.

631 Cairns, W. 2005. AIS and long range identification & tracking. *Journal of Navigation*, 58(2), 181-189.

632 Cattani, P.E., Lamour, M.R. 2015. Considerations regarding the sedimentation rates along E-W axis  
633 of the Paranaguá Estuarine Complex: A bathymetric approach. *Journal of Coastal Research*, In-  
634 Press.

635 Das, S.N., Das, S.K., Kariya, J.N. 2012. Simulation of return flow in restricted navigation channel for  
636 barge-tow movements. *Open Ocean Engineering Journal*, 5, 34–46.

637 Garel, E., López Fernández, L., Collins, M. 2008. Sediment resuspension events induced by the wake  
638 wash of deep-draft vessels. *Geo-Marine Letters*, 28(4), 205–211.

639 Gelinas, M., Bokuniewicz, H., Rapaglia, J., Lwiza, K.M.M. 2013. Sediment resuspension by ship  
640 wakes in the Venice Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 29(1), 8-17.

641 Gelpke, N., Visbeck, M. (eds.). 2010. *World Ocean Review 2010 : Living with the oceans*, Mare, 234p.

642 Gourlay, T. 2006. Flow beneath a ship at small underkeel clearance. *Journal of Ship Research*, 50(3),  
643 250–258.

644 Hammack, E.A., Tate, J.N. 2008. Considerations for modeling vessel-generated currents and bed shear  
645 stresses. ERDC/CHL CHETN-IX-17. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and  
646 Development Center.

647 Hochstein, A.B., Adams, C.E. 1989. Influence of vessel movements on stability of restricted channels.  
648 *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 115(4), 444-465.

- 649 Hofmann, H., Lorke, A., Peeters, F. 2008. The relative importance of wind and ship waves in the  
650 littoral zone of a large lake. *Limnology and Oceanography*, 53(1), 368-380.
- 651 Houser, C. 2010. Relative importance of vessel-generated and wind waves to salt marsh erosion in a  
652 restricted fetch environment. *Journal of Coastal Research*, 26(2), 230-240.
- 653 Houser, C. 2011. Sediment Resuspension by Vessel-Generated Waves along the Savannah River,  
654 Georgia. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(5), 246-257.
- 655 Ji, S.C., Ouahsine, A., Smaoui, H., Sergent, P. 2015. 3D Modeling of sediment movement by ships-  
656 generated wakes in confined shipping channel. *International Journal of Sediment Research*,  
657 29(1), 49-58.
- 658 Kelpšaitė, L., Parnell, K., Soomere, T. 2009. Energy pollution: the relative influence of wind-wave  
659 and vessel-wake energy in Tallinn Bay, the Baltic Sea. *Proceedings of the 10th International*  
660 *Coastal Symposium*, Journal of Coastal Research, Special Issue No 56, pp. 812-816.
- 661 Kennish, M.J. 2002. Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental*  
662 *Conservation*, 29(1), 78-107.
- 663 Lamour, M.R., Soares, C.R., Carrilho, J. 2004. Mapas de parâmetros texturais de sedimentos de fundo  
664 do complexo estuarino de Paranaguá PR. *Boletim Paranaense de Geociências*, 55(1), 77-82.
- 665 Lana, P.C., Marone, E., Lopes, R.M., Machado, E.C. 2001. The subtropical estuarine complex of  
666 Paranaguá Bay, Brazil. In: Seeliger, U.; Kjerfve, B. (eds.), *Coastal Marine Ecosystems of Latin*  
667 *America*. pp. 131-145.
- 668 Legates, D., McCabe, G. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and  
669 hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.
- 670 Lessa, G.C., Meyers, S.R., Marone, E. 1998. Holocene stratigraphy in the Paranaguá Bay Estuary,  
671 southern Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 68(6), 1060-1076.
- 672 Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S. 2004. Development and validation  
673 of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915.
- 674 Libardoni, B.G. 2014. Inventário do carbono no Complexo Estuarino de Paranaguá. Pontal do Paraná,  
675 Paraná: Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado.
- 676 Mantovanelli, A., Marone, E., Silva, E.T, Lautert, L.F., Klingenfuss, M.S., Prata, V.P., Noernberg,  
677 M.A., Knoppers, B.A., Angulo, R.J. 2004. Combined tidal velocity and duration asymmetries as

678 a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuarine, Coastal*  
679 *and Shelf Science*, 59(4), 523-537.

680 Marone, E., Guimarães, M.R., Prata Jr, V.P., Klingenfuss, M.S., Camargo, R. 1995. Caracterização  
681 física das condições oceanográficas, meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da Baía de  
682 Paranaguá, PR. *VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar*. Mar del Plata, Argentina.

683 Marone, E., Jamiyanaa, D. 1997. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the  
684 estuarine complex of the Bay of Paranaguá. *Nerítica*, 11, 95-107.

685 Nascimento, M.do, Neves, C., Maciel, G. de F. 2010. Modelo numérico de Boussinesq adaptado para  
686 a propagação de ondas de embarcação em águas rasas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*,  
687 15(4), 5-15.

688 Noernberg, M.A., Marone, E., Angulo, R. 2007. Coastal currents and sediment transport in Paranaguá  
689 Estuary Complex navigation channel. *Boletim Paranaense de Geociências*, 60-61(1), 45-54.

690 Rapaglia, J., Zaggia, L., Ricklefs, K., Gelinis, M., Bokuniewicz, H. 2011. Characteristics of ships'  
691 depression waves and associated sediment resuspension in Venice Lagoon, Italy. *Journal of*  
692 *Marine Systems*, 85(1-2), 45-56.

693 Rodriguez, J.F, Admiraal, D.M., Lopez, F., Garcia, M.H. 2002. Unsteady bed shear stresses induced  
694 by navigation: laboratory observations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 515-526.

695 Schroevers, M., Huisman, B.J.A., Van Der Wal, M., Terwindt, J. 2011. Measuring ship induced waves  
696 and currents on a tidal flat in the Western Scheldt estuary. *Current, Waves and Turbulence*  
697 *Measurements (CWTM), 2011 IEEE/OES 10th*, pp.123-129.

698 Soares, C.R, Lamour, M.R. 2008. Atividades portuárias na Baía de Paranaguá (PR): Histórico e  
699 características de navegação, canais de acesso, berços de atracação, bacia de evolução e áreas de  
700 fundeio. In: Boldrini, E.B., Soares, C.R, Paula, E.V. (Org). *Dragagens Portuárias no Brasil:*  
701 *Engenharia, Tecnologia e Meio Ambiente*. Antonina: ADEMADAN/ UNIBEM/ Secretaria de  
702 Ciência e tecnologia para Inclusão social. p. 26-45.

703 Soomere, T. 2005. Fast ferry traffic as a qualitatively new forcing factor of environmental processes  
704 in non-tidal sea areas: A case study in Tallinn Bay, Baltic Sea. *Environmental Fluid Mechanics*,  
705 5(4), 293-323.

706 Souza, M.M. 2012. Caracterização do transporte sedimentar na desembocadura sul do Complexo  
707 Estuarino de Paranaguá. Pontal do Paraná, Paraná: Universidade Federal do Paraná, Monografia,  
708 66p.

709 Souza, M.M. 2015. Modelagem computacional do Complexo Estuarino de Paranaguá sob a influência  
710 de ondas, marés e descarga fluvial. Pontal do Paraná, Paraná: Universidade Federal do Paraná,  
711 Dissertação de Mestrado, 41p.

712 Stockstill, R., Berger, R. 2001. Simulating barge drawdown and currents in channel and backwater  
713 areas. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127(5), 290–298.

714 Stolker, C., Verheij H.J. 2006. Ship induced water motions beneath the ship’s hull, *Proceedings*  
715 *PIANC congress*, Lisboa, Portugal.

716 Torsvik, T., Soomere, T. 2008. Simulation of patterns of wakes from high-speed ferries in Tallinn Bay.  
717 *Estonian Journal of Engineering*, 14(3), 232-254.

718 Torsvik, T., Soomere, T. 2009. Modeling of long waves from high speed ferries in coastal waters.  
719 *Proceedings of the 10th International Coastal Symposium*, Journal of Coastal Research Special  
720 Issue, 56, 1075-1079.

721 Trozzi, C., Vaccaro, R. 2000. Environmental impact of port activities. *International Conference on*  
722 *Maritime Engineering and Ports*, pp. 151-161.

723 Umgiesser, G., Sclavo, M., Carniel, S., Bergamasco, A. 2004. Exploring the bottom stress variability  
724 in the Venice Lagoon. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4), 161-178.

725 Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J.P. 2003. The  
726 predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and  
727 seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47, 295-327.

728 Van Rijn, L.C. 2007a. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of  
729 motion, bed roughness and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 649-  
730 667.

731 Van Rijn, L.C. 2007b. Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended  
732 transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 668-689.

733 Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K. 2012. A refined index of model performance.  
734 *International Journal of Climatology*, 32, 2088-2094.

735 Zhou, M., Roelvink, D., Verheij, H., Ligteringen, H. 2013. Study of passing ship effects along a bank  
736 by Delft3D-FLOW and XBeach. International Workshop on Next Generation Nautical Traffic  
737 Models 2013, Delft, The Netherlands Study, 71–80.