

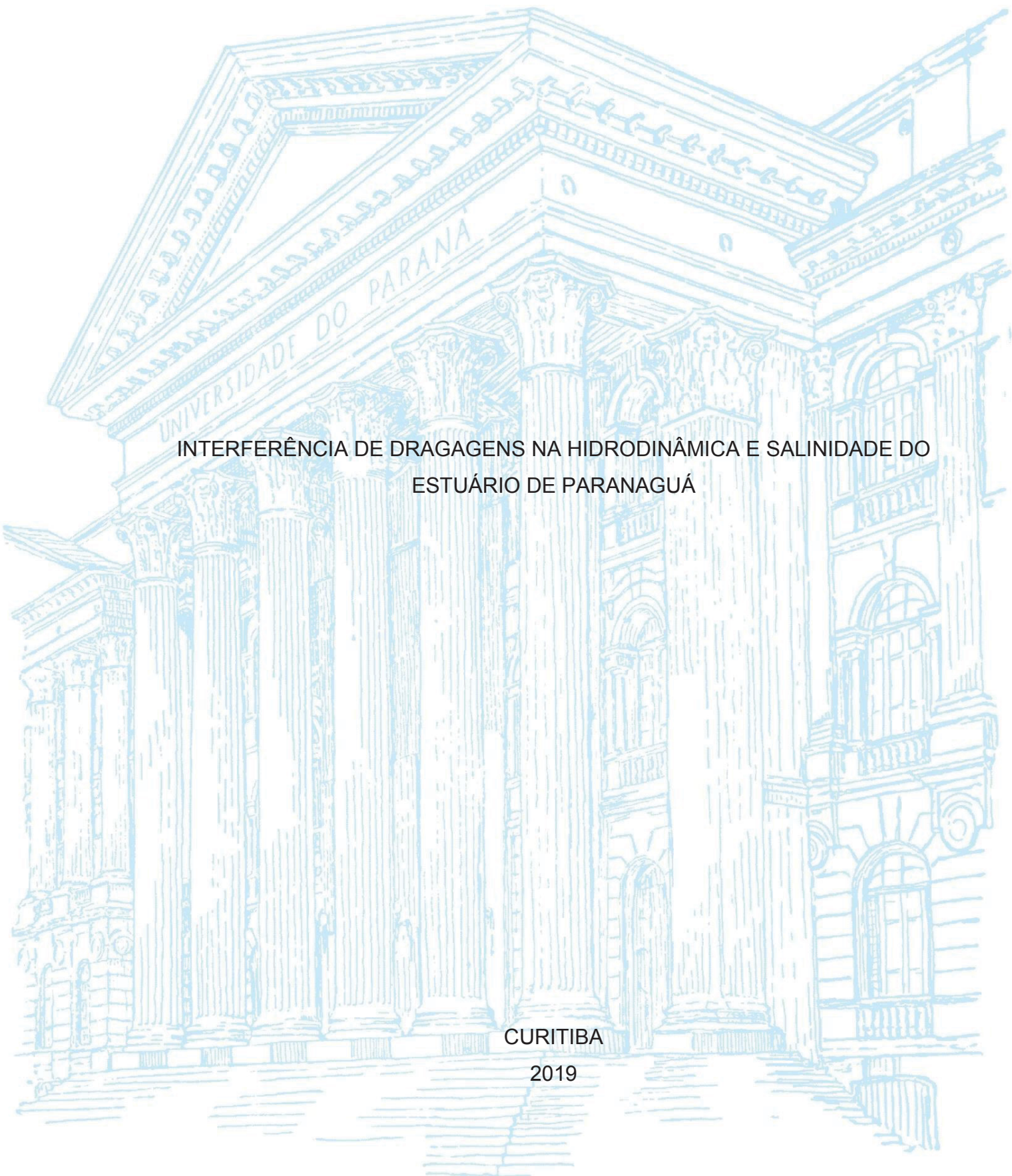
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAÍS NOGUEIRA DE REZENDE

INTERFERÊNCIA DE DRAGAGENS NA HIDRODINÂMICA E SALINIDADE DO
ESTUÁRIO DE PARANAGUÁ

CURITIBA

2019



THAÍS NOGUEIRA DE REZENDE

INTERFERÊNCIA DE DRAGAGENS NA HIDRODINÂMICA E SALINIDADE DO
ESTUÁRIO DE PARANAGUÁ

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Tobias Bleninger

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R467i

Rezende, Thaís Nogueira de

Interferência de dragagens na hidrodinâmica e salinidade do estuário de Paranaguá [recurso eletrônico] / Thaís Nogueira de Rezende. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental,
2019.

Orientador: Tobias Bernhard Bleninger .

CDD: 526.982

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **THAIS NOGUEIRA DE REZENDE**, intitulada: **"INTERFERÊNCIA DE DRAGAGENS NA HIDRODINÂMICA E SALINIDADE DO COMPLEXO ESTUÁRIO DE PARANAGUÁ"**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 30 de Abril de 2019.


TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Presidente da Banca Examinadora


EDUARDO AYRES YASSUDA
Avaliador Externo (TT)


JOSÉ EDUARDO GONÇALVES
Avaliador Interno ()


JOSÉ JUNJI OTA
Avaliador Interno (UFPR)

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL.**

No dia trinta de abril de dois mil e dezenove às 09:30 horas, na sala SIMEPAR, Centro Politécnico do Setor de TECNOLOGIA da Universidade Federal do Paraná, foram instalados os trabalhos de arguição da Mestranda **THAIS NOGUEIRA DE REZENDE** para a Defesa Pública de sua Dissertação de Mestrado intitulada: **"INTERFERÊNCIA DE DRAGAGENS NA HIDRODINÂMICA E SALINIDADE DO COMPLEXO ESTUÁRIO DE PARANAGUÁ"**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: **TOBIAS BERNWARD BLENINGER (UFPR)**, **JOSÉ EDUARDO GONÇALVES ()**, **EDUARDO AYRES YASSUDA (TT)**, **JOSÉ JUNJI OTA (UFPR)**. Dando início à sessão, a presidência passou a palavra a(o) discente, para que a mesma expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. A aluna respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela aprovação da aluna. A Mestranda foi convidada a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de Mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, **TOBIAS BERNWARD BLENINGER**, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

Observações: Título correto: Interferência de dragagens na hidrodinâmica e salinidade do estuário de Paranaguá

Curitiba, 30 de Abril de 2019.


TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Presidente da Banca Examinadora


EDUARDO AYRES YASSUDA
Avaliador Externo (TT)


JOSE EDUARDO GONÇALVES
Avaliador Interno ()


JOSE JUNJI OTA
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná por oferecer uma formação impecável acadêmica, profissional e pessoal, desde o meu ingresso na graduação – em Engenharia Civil.

Agradeço ao curso de Engenharia Civil da UFPR, que abriu diversas portas, inclusive a de me capacitar para acompanhar um programa de pós-graduação renomado, como o PPGERHA. Além de me apresentar a mestres que levarei como exemplo por muitos anos.

Agradeço ao PPGERHA, por acreditarem na minha capacidade para que eu me tornasse mestre. E especialmente a compreensão, da secretaria, coordenação e professores, com problemas que apareceram no meio do caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tobias Bleninger, o qual tive o imenso prazer de poder trabalhar durante esses dois anos. Agradeço pela orientação competente, pela confiança, compreensão, e por todo o apoio. Obrigada por transmitir parte da sua sabedoria, não só profissional como pessoal. Com certeza um grande homem!

Agradeço a minha família, por sempre ter me incentivado ao estudo, pelo esforço e amparo. E por todos os momentos de alegria e aconchego, que serviram para recarregar minhas energias.

E por fim, aos meus amigos do PPGERHA e do ITTI, que fizeram dessa caminhada muito leve, alegre e prazerosa. Obrigada pelas dicas, ajudas, incentivos e conversas com cafezinhos. Um agradecimento especial à Tabata Miranda, que me passou grande parte do seu aprendizado de modelagem e compartilhou seu trabalho de dissertação, para que pudéssemos evoluir o modelo.

O que sabemos é uma gota;
O que ignoramos é o oceano.
Mas o que seria o oceano se não
infinitas gotas?

Isaac Newton

RESUMO

Os estuários são áreas de grande riqueza ambiental e de alto potencial econômico, o que destaca a importância de estudos, obras e planejamentos nessas regiões. A área de estudo é o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) e, com dados disponibilizados por pesquisadores da região, foi analisado utilizando o sistema de modelagem Delft3D. As forçantes consideradas foram as de maré, descargas fluviais e parâmetros físicos. Com a implementação de um modelo tridimensional foi feita a avaliação da hidrodinâmica e da cunha salina ao longo do estuário, sobretudo na região portuária. O modelo foi calibrado e validado para um cenário base. Um segundo cenário foi proposto como simulação de dragagem até os Portos de Paranaguá e Antonina. As variações de velocidade, salinidade e vazões foram computadas, por medições pontuais, em seção e em gráficos espaciais. As interferências da dragagem atingiram grande parte do estuário, em todas as análises, com reduções de velocidade de até 20% do cenário base. Paralelamente as vazões também se mostraram alteradas, com variações de fluxo de 600 a 800 m³/s. A salinidade aumentou mais significativamente na montante do estuário. A temperatura pouco se alterou, sendo desprezada uma análise mais minuciosa.

Palavras chave: Modelagem, estuário, porto, hidrodinâmica, cunha salina, Delft3D.

ABSTRACT

Estuaries are areas of great environmental wealth and high economic potential, which highlights the importance of studies, works and planning in these regions. The study area is the Paranaguá Estuary Complex (CEP) and was analyzed through the Delft3D modeling system. The forces considered were tidal, river discharges and physical parameters. With the implementation of a three-dimensional model, hydrodynamics and salt wedges were evaluated along the estuary, especially in the port region. The model was calibrated and validated for a baseline scenario. A second scenario was proposed as a dredging simulation to the ports of Paranaguá and Antonina. Variations in velocity, salinity and flow rates were computed by means of spot measurements, section and spatial graphs. Dredging interferences reached a large part of the estuary in all analyzes, with speed reductions of up to 20% of the baseline scenario. At the same time, the flow rates were also altered, with flow variations of 600 to 800 m³ / s. The salinity increased most significantly in the amount of the estuary. The temperature did not change much, so a more detailed analysis being neglected.

Key words: Modeling, estuary, port, hydrodynamics, salt wedge, Delft3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários de Cunha Salina.	19
Figura 2.2 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários Parcialmente Misturado.....	19
Figura 2.3 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários Bem Misturado.	20
Figura 2.4 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários de Fiorde.....	20
Figura 2.5 – Orientação do sistema de coordenadas ξ e η , onde σ é o eixo perpendicular aos demais.	22
Figura 2.6 – Modelo da caixa para balanço de massa.	25
Figura 2.7 – Esquema de uma secção transversal de um estuário, com as regiões de fluxo líquido para fora (1) e para dentro (2).	26
Figura 2.8 – Cunha salina em um esquema de estuário prismático.	27
Figura 2.9 - Solução adimensional do comprimento da cunha em função do número de Froude.	29
Figura 3.1 – Distribuições dos pontos de pressão e componentes da velocidade na grade Arakawa-C	36
Figura 3.2 – Modelo de coordenadas verticais: σ , a esquerda; e Z , a direita.	36
Figura 3.3 – Localização do Porto de Paranaguá no Brasil	39
Figura 3.4 – Baía de Paranaguá e Antonina	40
Figura 3.5 - Localização dos Berços e Píeres do Porto de Paranaguá.....	40
Figura 3.6 – Grade numérica e condições de contorno aplicados na região de estudo.	44
Figura 3.7 – Batimetria gerada no modelo após interpolação triangular.	46
Figura 3.8 – Número de Courant no modelo hidrodinâmico do CEP – com <i>timestep</i> = 60.	47
Figura 3.9 – Resolução (m) da grade numérica para o CEP.....	48
Figura 3.10 – Ortogonalidade ($\cos \varphi$) da grade numérica para o CEP.	49
Figura 4.1 – Nível de maré medido e simulados, na entrada do canal portuário.....	52
Figura 4.2 – Magnitude da velocidade no ponto de observação “porto paranagua”..	52

Figura 4.3 - Salinidade de superfície e de fundo no ponto de observação “porto paranagua”	53
Figura 4.4 - Nível de maré observado e simulado pelo modelo adotado, na entrada do canal portuário e no período estável.	53
Figura 4.5 – Região de dragagem prevista no canal portuário de Paranaguá.	54
Figura 4.6 – Batimetria alterada no modelo.	55
Figura 4.7 – Diferença de batimetria.	55
Figura 4.8 – Pontos de observação do estudo e seções transversais.	56
Figura 4.9 – Sessão criada no canal de navegação para observação.	57
Figura 4.10 – Seção ao longo do canal de navegação e batimetrias dos dois cenários.	57
Figura 5.1 – Nível de maré (m) medido e simulado no Canal da Galheta	58
Figura 5.2 – Velocidades ao longo das camadas, nas direções x e y, no período de avaliação, no ponto de observação “porto paranagua”.	59
Figura 5.3 – Velocidades ao longo das camadas, nas direções x e y, no período de avaliação, no ponto de observação “porto antonina”	60
Figura 5.4 – Magnitude da velocidade média ao longo das camadas, no período de avaliação, no ponto de observação “porto antonina”	60
Figura 5.5 – Magnitude da velocidade média de máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	61
Figura 5.6 – Magnitude da velocidade média em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	61
Figura 5.7 – Magnitude da velocidade média de máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	62
Figura 5.8 – Magnitude da velocidade horizontal de máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	62
Figura 5.9 – Magnitude da velocidade horizontal em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	63
Figura 5.10 – Magnitude da velocidade horizontal de máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	63
Figura 5.11 – Salinidade no ponto de observação “porto paranagua” – cenário base.	64
Figura 5.12 – Salinidade no ponto de observação “porto antonina” – cenário base.	65

Figura 5.13 – Salinidade na superfície em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	66
Figura 5.14 – Salinidade no fundo em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	66
Figura 5.15 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	67
Figura 5.16 – Salinidade na superfície em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	68
Figura 5.17 – Salinidade no fundo em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	68
Figura 5.18 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	69
Figura 5.19 – Salinidade na superfície em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	69
Figura 5.20 – Salinidade no fundo em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	70
Figura 5.21 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	70
Figura 5.22 – Salinidade na máxima enchente – às 2:00 – cenário base.	71
Figura 5.23 – Salinidade em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.	71
Figura 5.24 – Salinidade na máxima vazante – às 18:00 – cenário base.	71
Figura 5.25 – Seção considerada no cálculo teórico do comprimento da cunha salina.	72
Figura 5.26 – Vazão instantânea nas seções principal e secundária, no período calibrado.	73
Figura 5.27 – Vazões instantâneas nas seções principal e secundária, de 19/10 à 21/10.	73
Figura 5.28 – Vazão acumulada nas seções principal e secundária, no período calibrado.	74
Figura 5.29 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto “porto paranagua” – período 19/10 – 21/10.	75
Figura 5.30 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto “porto antonina” – período 19/10 – 21/10.	75
Figura 5.31 – Diferença na magnitude da velocidade média às 2:00 (cenário base – cenário dragado).	76

Figura 5.32 – Diferença na magnitude da velocidade média às 4:00 (cenário base – cenário dragado).	77
Figura 5.33 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado).	77
Figura 5.34 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado), na região portuária.	78
Figura 5.35 – magnitude de velocidade no ponto “porto paranagua” nos dois cenários e diferença entre elas.	78
Figura 5.36 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 2:00 (cenário base – cenário dragado).	79
Figura 5.37 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 4:00 (cenário base – cenário dragado).	79
Figura 5.38 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 18:00 (cenário base – cenário dragado).	79
Figura 5.39 – Diferença de salinidade no ponto de observação “porto paranagua” (cenário base – cenário dragado).....	80
Figura 5.40 – Estratificação no ponto de observação “porto paranagua”, nos cenários base e dragado e respectiva diferença entre eles.....	81
Figura 5.41 – Diferença de salinidade no ponto de observação “porto antonina” (cenário base – cenário dragado).....	81
Figura 5.42 – Estratificação no ponto de observação “porto antonina”, nos cenários base e dragado e respectiva diferença entre eles.....	82
Figura 5.43 – Diferença na salinidade na superfície às 2:00 (cenário base – cenário dragado).....	83
Figura 5.44 – Diferença na salinidade no fundo às 2:00 (cenário base – cenário dragado).....	83
Figura 5.45 – Diferença na salinidade na superfície às 4:00 (cenário base – cenário dragado).....	84
Figura 5.46 – Diferença na salinidade no fundo às 4:00 (cenário base – cenário dragado).....	84
Figura 5.47 – Diferença na salinidade na superfície às 18:00 (cenário base – cenário dragado).....	85
Figura 5.48 – Diferença na salinidade no fundo às 18:00 (cenário base – cenário dragado).....	85

Figura 5.49 – Diferença na salinidade às 2:00 (cenário base – cenário dragado).....	86
Figura 5.50 – Diferença na salinidade às 4:00 (cenário base – cenário dragado).....	87
Figura 5.51 – Diferença na salinidade às 18:00 (cenário base – cenário dragado)...	87
Figura 5.52 – Diferença entre os cenários nas vazões instantâneas nas duas seções e no período calibrado.....	88
Figura 5.53 – Diferença entre os cenários nas vazões instantâneas nas duas seções – período 19/10 – 21/10.	88
Figura 5.54 – Vazões acumuladas nos dois cenários e diferença entre eles, nas duas seções e no período calibrado.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais estudos hidrodinâmicos no CEP	32
Tabela 3.1 – Calado operacional conforme o berço de atracação no Porto de Paranaguá.....	41
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados na modelagem hidrodinâmica do CEP, pelo Delft3D.	43
Tabela 3.3 – Parâmetros de entrada das condições de contorno do modelo hidrodinâmico.	45
Tabela 3.4 – Principais componentes harmônicas de maré para o CEP.	45
Tabela 4.1 – Dados estatísticos das 5 simulações.....	51
Tabela 4.2– Dados estatísticos do modelo adotado no período considerado	54
Tabela 5.1 – Dados estatísticos do modelo para o período de 19/10/2013 à 21/10/2013.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	ESTUÁRIOS	18
2.2	HIDRODINÂMICA.....	21
2.2.1	Equações Fundamentais do Movimento do Fluido	21
2.3	CIRCULAÇÃO E BALANÇO SALINO.....	25
2.4	MODELAGEM MATEMÁTICA	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	MODELO NUMÉRICO DELFT3D	35
3.1.1	Módulo para Geração da Grade Numérica – RGFGRID	35
3.1.2	Módulo Hidrodinâmico - FLOW	37
3.1.3	Programa de Pós-Processamento - QUICKPLOT	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP)	39
3.2.1	APLICAÇÃO DO MODELO DELFT3D	42
4	VALIDAÇÃO DO MODELO	50
4.1	PERÍODO CONSIDERADO	52
4.2	CENÁRIOS PROPOSTOS	54
5	RESULTADOS	58
5.1	CENÁRIO BASE.....	58
5.1.1	Velocidade	59
5.1.2	Salinidade.....	64
5.1.3	Vazão	73
5.2	VARIAÇÃO ENTRE CENÁRIOS	74
5.2.1	Velocidade.....	75
5.2.2	Salinidade.....	80
5.2.3	Vazão	88
6	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE 1	98
	APÊNDICE 2	99

1 INTRODUÇÃO

Tendo a função de proporcionar a movimentação de mercadorias, principalmente de origens e destinos internacionais, os portos têm importância fundamental na economia de uma cidade, região, país e continente.

Possuindo uma costa extensa e alta densidade de rios, o Brasil conta com diversos portos, entre fluviais e marítimos. Os portos marítimos devem proporcionar às embarcações um lugar seguro entre oceano e costa, afim de dispor segurança e eficiência às operações portuárias. Para isso precisam ser localizados em áreas protegidas de ondas e correntes, e possuírem canais de acessos e área de fundeio com características condizentes às embarcações que atracam no porto.

Alguns estuários apresentam características naturais convenientes às instalações de terminais portuários, e assim muitos portos se instalaram nessas regiões. Pesquisas envolvendo o estudo na área estuarina podem auxiliar, apontando ocorrências naturais, que afetam esse serviço, e possíveis impactos que as operações portuárias podem causar no meio ambiente. Em alguns casos as simulações numéricas podem sugerir contornos a essas limitações e/ou até diferentes projetos.

Os estuários, além de possuírem alta riqueza natural, geralmente estão situados em locais próximos às cidades, e são bastante povoados. Frisando a cautela em obras e movimentações feitas no local, para que seja a de menor impacto negativo ao meio.

Diversos fatores interferem no equilíbrio dinâmico do ecossistema estuarino e na manutenção da profundidade do canal portuário. Uma análise de sensibilidade abrangendo diferentes forçantes e avaliando as consequências na: hidrodinâmica; salinidade; gradiente de temperatura; e no transporte de sedimentos; é essencial para planejamentos de dragagens e de possíveis implementações de obras fixas. Ao possuir uma política de manutenção da profundidade do canal portuário coerente, tanto a ala econômica quanto a ambiental se beneficiam.

Com diversas variáveis, identificar a causa e o efeito das alterações que as características físicas dos estuários sofrem constantemente, torna-se uma tarefa complexa. Modelos numéricos tendem a auxiliar nas análises através de simulações, as quais devem representar fidedignamente a dinâmica física da área de estudo.

A análise foi feita através de um estudo de caso, no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), onde foram consideradas diversas condições de contorno de:

maré; pressão; e descarga fluvial. As quais foram implementadas em um modelo tridimensional do sistema Delft3D, que também permite especificar múltiplos parâmetros iniciais, como densidade da água, rugosidade, etc.

Na região estudada a movimentação de navios intensa e é alvo de programas de dragagens constantes. O aumento das profundidades do canal portuário e dos berços de acostamento seriam de grande relevância econômica, onde navios com maiores capacidades poderiam ser atendidos pelo porto de Paranaguá. Contudo todas as modificações físicas que ocorreriam com uma obra desse porte devem ser avaliadas.

Parte-se da hipótese de que com o aumento da profundidade a velocidade do escoamento é modificada, podendo ocasionar também variações no regime hidrodinâmico. Além disso os gradientes de temperatura e salinidade podem ser alterados ao longo de todo o estuário, com águas mais salgadas adentrando e possivelmente com variações nas temperaturas.

1.1 OBJETIVO

Através da modelagem tridimensional aplicada no Complexo Estuarino de Paranaguá, é observado se o aumento da profundidade do canal portuário feito através de obras de dragagens altera a hidrodinâmica do estuário. Paralelamente é verificado se os gradientes de salinidade e de temperatura variam, o quanto, e as áreas afetadas.

Para que esses objetivos fossem alcançados os seguintes objetivos específicos foram estipulados:

- 1) Modelagem em 2D no CEP para a validação do modelo;
- 2) Modelagem em 3D com os dados batimétricos fornecidos pelo Centro de Estudos do Mar (CEM);
- 3) Modelagem em 3D com aumento da profundidade no canal portuário e nos berços de atracação, simulando uma situação pós dragagem;
- 4) Avaliação das respostas hidrodinâmica, e dos gradientes de salinidade e temperatura nos dois cenários. E confronto entre eles.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentado o embasamento metodológico utilizado na pesquisa científica. No subcapítulo 2.1 encontra-se a teoria dos estuários, bem como suas possíveis classificações. O comportamento hidrodinâmico e suas equações fundamentais estão descritas no subcapítulo 2.2, seguido pela circulação e balanço salino, no subcapítulo 2.3. E, por fim, no subcapítulo 2.4 a modelagem matemática hidrodinâmica é abordada, apresentando também trabalhos de vertentes similares que possam contribuir com esta pesquisa científica.

2.1 ESTUÁRIOS

Estuários são locais de foz de rios em águas salgadas do mar, onde formam-se ecossistemas extremamente produtivos. Estes são oito vezes mais eficientes em conversão de energia solar em biomassa vegetal do que em agroecossistemas e em até vinte e cinco vezes do que em mar aberto (PINTO-COELHO & HAVENS, 2016). Além de possuir alta biodiversidade, essas zonas costeiras contribuem em processos ecológicos de outros ecossistemas do seu entorno. O que enaltece a importância desses corpos hídricos e da sua preservação (TWILLEY et al. 1996).

Trata-se de um corpo aquático com características não inertes, assim os estuários naturalmente sofrem mudanças periódicas conforme a maré, estação do ano, condições climáticas, salinidade e luminosidade. Esses e outros fatores se alteram gerando uma vida dinâmica nesses locais. A concentração de sal, por exemplo, varia diariamente e é diretamente proporcional ao nível das marés. Nesse ecossistema plantas e animais são adaptados a essas flutuações e, inclusive, necessitam desses ciclos para a sobrevivência (RIDD & STIEGLITZ. 2002). A alteração dessa hidrodinâmica pode interferir nesses processos.

Difusão e advecção são os principais mecanismos de mistura entre água doce e salgada nos corpos estuarinos. Pritchard, em 1952, classificou os estuários de acordo com o processo de mistura, como especificado a seguir:

- Cunha salina: Estuário de cunha salina altamente estratificado, em que a descarga do rio domina a ação da maré. A mistura da água é feita por advecção vertical, de acordo com a Figura 2.1, onde apresenta-se faixas de concentração de sal bem definidas, conforme a profundidade e distância do oceano.

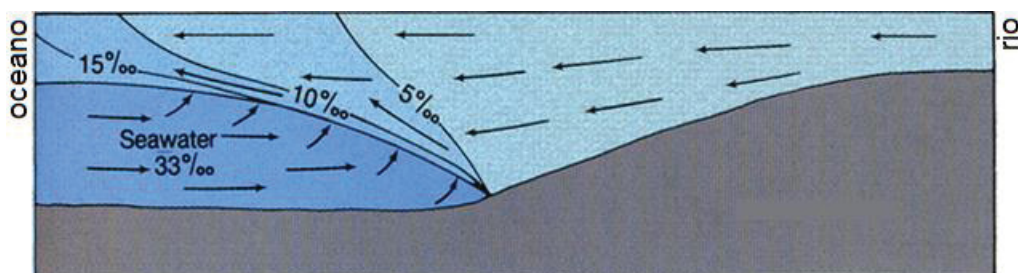


Figura 2.1 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários de Cunha Salina.

Fonte: Pinet, 2003.

- Parcialmente misturado: Neste caso o volume de água fica moderadamente estratificado. O fluxo das marés é equivalente à descarga do rio. A advecção vertical e a turbulência misturam o sistema gradualmente, tanto ao longo da profundidade, quanto nas direções horizontais. A Figura 2.2 expõe melhor esse tipo de estuário, o qual também apresenta diferentes faixas de concentração de sal, porém menos estratificada.

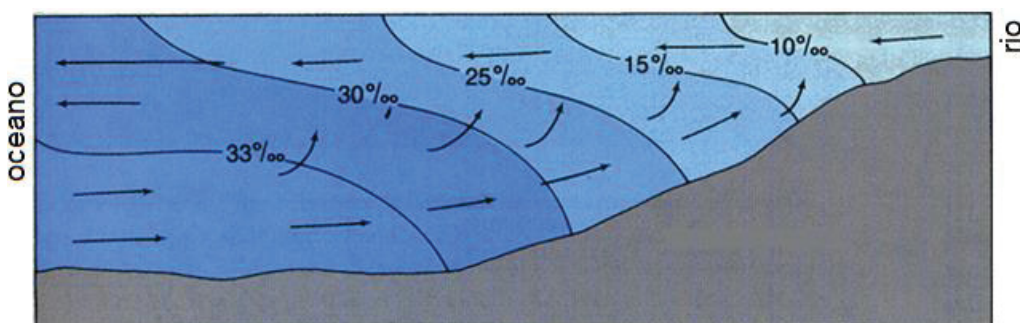


Figura 2.2 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários Parcialmente Misturado.

Fonte: Pinet, 2003.

- Bem misturado: Comum em estuários rasos. A descarga fluvial é singela e a influência da maré dominante, identificando forte mistura turbulenta. Não há gradientes de salinidade verticais representativos. Os gradientes

de salinidade longitudinais são presentes, contudo com menor intensidade do que os estuários do tipo parcialmente misturados, como pode ser observado na Figura 2.3

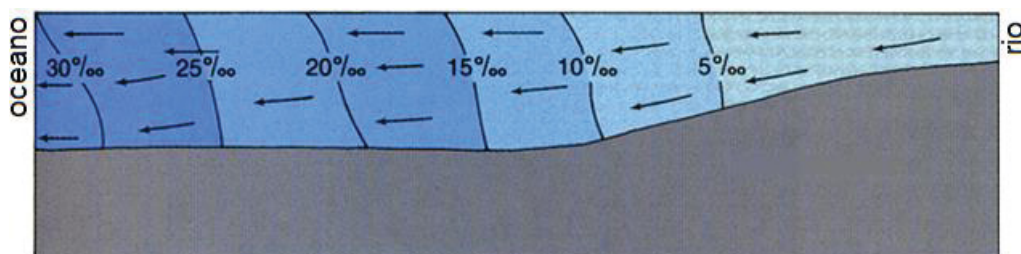


Figura 2.3 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários Bem Misturados.

Fonte: Pinet, 2003.

- Fiorde: Em presença de soleira os estuários podem apresentar águas profundas estagnadas, onde não há forte interação da água oceânica com as fluviais. A água salgada, mais densa, se estratifica ao fundo e a parte superficial com maior influência dos rios, e baixa concentração salina, conforme a Figura 2.4.

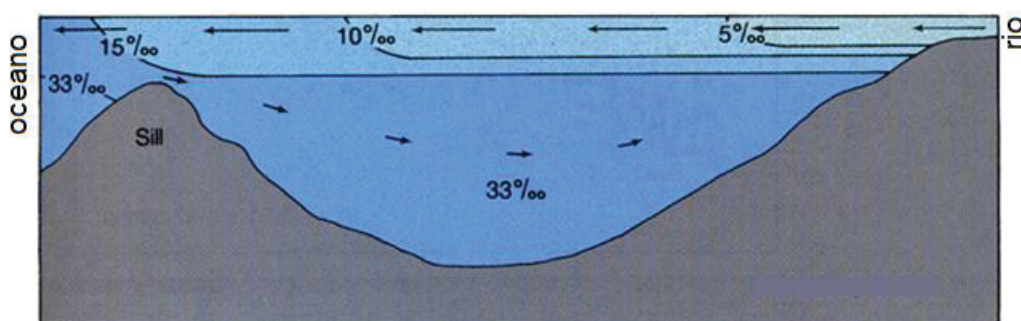


Figura 2.4 – Concentrações de Sal e Circulação Típica em Estuários de Fiorde.

Fonte: Pinet, 2003.

A propagação da maré é definida pela distância que uma partícula percorre ao longo do eixo principal do estuário. Ao se propagar para dentro do estuário a onda de maré encontra um ambiente de menor profundidade e de estreitamento dos canais, e então sofre distorções. E pelo princípio de conservação de volume, a amplitude da maré tende a se elevar. O atrito com o fundo e com as margens, causa turbulência e dissipa a energia da maré, contendo o avanço continente adentro (MASSELINK & HUGHES, 2003).

2.2 HIDRODINÂMICA

A circulação hidrodinâmica dos estuários depende da descarga fluvial, da maré, do vento, da geometria do local (costa e fundo), dos gradientes de salinidade, rugosidade do leito e interferentes externos (KJERFVE, 1988). A seguir as equações fundamentais de movimentação do fluido serão apresentadas.

2.2.1 Equações Fundamentais do Movimento do Fluido

Dentre as equações governantes na hidrodinâmica há de se destacar a equação de conservação de quantidade de movimento. E escoamento em regime turbulento é representado pela equação de Navier-Stokes, para um fluido incompressível de superfície livre.

O modelo utilizado nessa pesquisa, o Delft3D, resolve as equações de Navier Stokes e supõe que as escalas horizontais de comprimento e de tempo são expressivamente maiores do que a escala vertical. As acelerações verticais são desconsideradas, e resultam na equação da pressão hidrostática. Para modelos tridimensionais as velocidades verticais são calculadas a partir da equação de continuidade. Uma grade de diferenças finitas é utilizada para a discretização das equações diferenciais parciais com condições iniciais e de contorno correspondentes.

As linhas de costa são predominantemente curvas, assim essas regiões são melhor representadas por coordenadas curvilíneas ortogonais. O sistema de simulação da Deltares (2014) utiliza o caso especial dentre elas, as coordenadas esféricas, onde:

$$\xi = \lambda = \text{longitude};$$

$$\eta = \varphi = \text{latitude};$$

$$\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos\varphi;$$

$$\sqrt{G_{\eta\eta}} = R = \text{Raio da Terra.}$$

A orientação do modelo esférico é definida como o ângulo entre o norte verdadeiro e o eixo y do sistema de coordenadas cartesianas (Figura 2.5).

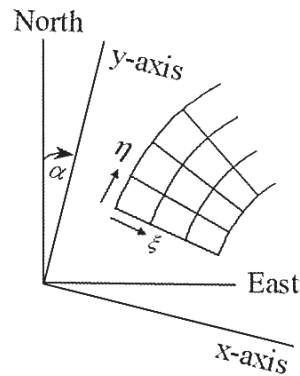


Figura 2.5 – Orientação do sistema de coordenadas ξ e η , onde σ é o eixo perpendicular aos demais.
Fonte: Hydraulics, 2014.

As equações governantes da hidrodinâmica para um fluido incompressível em superfície livre surgem das equações de Navier-Stokes e seguem os princípios de Conservação de massa e de Conservação de quantidade de movimento. Considerando que o fluxo é predominantemente horizontal, as acelerações na direção vertical podem ser desprezadas. Assim a solução de Navier-Stokes é descrita, segundo a Hydraulics (2014) conforme as equações 1, 2 e 3.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v =$$

$$-\frac{P_{\xi}}{\rho \sqrt{G_{\xi\xi}}} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u =$$

$$-\frac{P_{\eta}}{\rho \sqrt{G_{\eta\eta}}} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (3)$$

Onde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}$: Coeficientes utilizados para transformar coordenadas retangulares em coordenadas curvilíneas;

H : profundidade total da água;

σ : coordenada vertical;

$f u$ e $f v$: força de Coriolis;

F_ξ e F_η : fluxos turbulentos;

P_ξ e P_η : gradientes de pressão hidrostática;

M_ξ e M_η : contribuições devido a fontes externas.

t : tempo;

ρ : densidade do fluído;

ν : coeficiente de viscosidade turbulenta.

As forças F_ξ e F_η nas equações de momento horizontal representam o desequilíbrio das tensões de Reynolds horizontais, que são modeladas através da viscosidade turbulenta. O coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal, ν_H , é expressivamente maior que a viscosidade turbulenta vertical, ν_V .

O coeficiente de viscosidade horizontal é obtido pela soma dos coeficientes referentes à turbulência 2D, à turbulência 3D e à viscosidade molecular. Já o coeficiente de viscosidade vertical desconsidera a componente referente à turbulência 2D, uma vez que é associada com a contribuição do movimento horizontal.

As forças F_ξ e F_η nas equações do momento, caracterizam o desequilíbrio da tensão horizontal de Reynolds e são calculadas através das seguintes equações:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad (4)$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (5)$$

Onde $\tau_{\xi\xi}$, $\tau_{\xi\eta}$ e $\tau_{\eta\eta}$ são as componentes do tensor de tensões de Reynolds. Porém, a partir de uma certa escala da área modelada, as tensões de corte ao longo dos limites fechados podem ser desprezadas. Assim as forças F_ξ e F_η são simplificadas, resultando nas seguintes equações:

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (6)$$

$$F_{\eta} = v_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\xi\xi}}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (7)$$

A equação de continuidade é expressa pela soma das variações de massa, resultando em zero:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Onde:

ρ = massa específica do fluido;

u = velocidade do fluido na direção x;

v = velocidade do fluido na direção y;

w = velocidade do fluido na direção z.

Integrando a equação acima obtém-se a equação de continuidade da média na profundidade total, considerando as condições de contorno da superfície da água e o nível do leito:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial((d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial((d + \zeta)v\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (9)$$

Onde:

Q : contribuição por unidade de área devido à descarga;

d : profundidade da água abaixo do plano de referência;

ζ : elevação da superfície

u : componente da velocidade integrada verticalmente na direção ξ ;

v : componente da velocidade integrada verticalmente na direção η

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\sqrt{G_{\eta\eta}}$: coeficientes de transformação de coordenadas retangulares em coordenadas curvilíneas.

2.3 CIRCULAÇÃO E BALANÇO SALINO

Os escoamentos em geral transportam também substância dissolvidas, salinidade e / ou calor, os quais ocorrem por efeito de advecção e difusão (Brown, 2004). A lei da continuidade para uma seção no estuário pode ser descrita simplificadamente (desprezando evaporação e precipitação), como na equação 10.

$$I = O + R \quad (10)$$

Onde:

O: taxa de volume de saída;

I: taxa de volume de entrada;

R: taxa de descarga do rio.

Um modelo de caixa pode representar o sistema, relacionando as vazões (R, O e I) e as salinidades (S_I e S_O) (Figura 2.6).

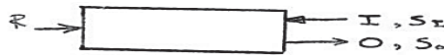


Figura 2.6 – Modelo da caixa para balanço de massa.

Fonte: Brown, 2004.

Sendo S_I a salinidade da água de entrada e S_O a de saída, o balanço salino pode ser expresso simplificadamente como na equação 11:

$$S_I \times I = S_O \times O \quad (11)$$

Combinando as equações 10 e 11 tem-se a seguinte equação:

$$O = \frac{S_I}{S_I - S_O} R \quad (12)$$

Observa-se que quanto mais próxima a salinidade de saída (S_O) da salinidade de entrada (S_I), o volume de saída (O) aumenta, reduzindo a descarga do rio (R). Isso ocorre porque grande quantidade de água salgada está sendo arrastadas e misturadas com o fluxo de saída do rio. Assim, à medida que a salinidade de saída se

aproxima da salinidade de entrada, o volume de saída (O) se torna muito menor que a descarga do rio.

No escoamento observado em uma seção transversal específica (Figura 2.7), a qual está dividida em duas camadas, pode-se chegar nas equações 13 e 14. As áreas de superfície e de fundo representam respectivamente as áreas de prevalência de escoamento de entrada e de saída, onde a água do mar, com maior salinidade e, portanto, mais densa, tende a precipitar e concentrar-se na região inferior (Vieira, 2018).

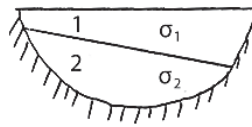


Figura 2.7 – Esquema de uma secção transversal de um estuário, com as regiões de fluxo líquido para fora (1) e para dentro (2).

Fonte: Vieira, 2018.

$$I = \int \int_{\sigma_1} \int_0^{nT} U \, dt \, d\sigma \quad (13)$$

$$O = \int \int_{\sigma_2} \int_0^{nT} U \, dt \, d\sigma \quad (14)$$

Onde:

U: velocidade de corrente ao longo do estuário;

t: tempo;

n: número de ciclos de maré;

T: período;

σ_1 : área 1, de prevalência de fluxo de saída do estuário;

σ_2 : área 2, de prevalência de fluxo de entrada no estuário.

Então o balanço de sal pode ser descrito pela equação 15:

$$\int \int_{\sigma_1} \int_0^{nT} US' \, dt \, d\sigma + \int \int_{\sigma_2} \int_0^{nT} US' \, dt \, d\sigma = 0 \quad (15)$$

Onde:

S': massa de sal por unidade de volume

O cálculo do comprimento de uma cunha de salina, pode ser representado pelo modelo simples de duas camadas, representado na Figura 2.8. Supõe-se, atipicamente, que as influências das marés podem ser negligenciadas e que a forma do estuário é prismática com profundidade e largura constantes. Schijf e Schönfeld, em 1953, abordou analiticamente o alcance da cunha salina em função da profundidade da água (h) e do fluxo do rio (R).

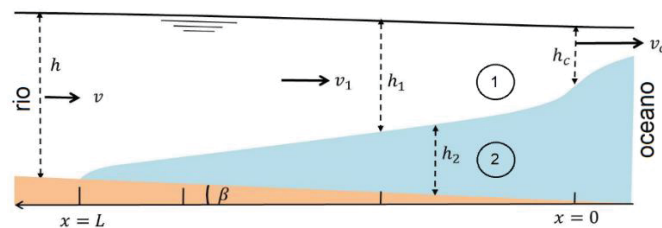


Figura 2.8 – Cunha salina em um esquema de estuário prismático.

Essa abordagem também considera duas camadas, sendo uma salgada (camada 2) e outra doce (camada 1), cada uma com sua espessura constantes e salinidades e velocidades homogêneas. Então pode-se fazer o equilíbrio das acelerações devido a variações de densidade por declives de pressão $\left(\frac{dp}{dx}\right)$, para ambas as frentes – com o atrito na interface das duas camadas induzidas pelo fluxo subjacente do rio.

A frente de intrusão da água do mar é acelerada pela variação de pressão relacionada às variações da espessura de ambas as camadas, ao longo do eixo horizontal. Quanto mais à montante do estuário, mais o declive dos rios deve ser considerado para a variação de pressão. Com isso a equação 16 pode ser desenvolvida para o uso das variações de pressão na seção salina.

$$\frac{dp_2}{dx} = g\rho_2 \left(\beta + \frac{dh_2}{dx} \right) + g\rho_1 \left(\frac{dh_1}{dx} \right) \quad (16)$$

Onde:

ρ_1 : densidade da água doce;

ρ_2 : densidade da água salgada;

β : declive do leito;

h_1 : espessura de água doce;

h_2 : espessura de água salgada.

Em uma seção a jusante, o fluxo do rio é progressivamente mais fino e quando o sistema é acelerado, um gradiente hidráulico é criado. Além disso a variação de pressão na camada de água doce é ainda mais acelerada, e pode ser descrita por:

$$\frac{dp_1}{dx} = g\rho_1 \left(\beta + \frac{dh_2}{dx} \right) + g\rho_1 \left(\frac{dh_1}{dx} \right) \quad (17)$$

A tensão de cisalhamento das interfaces (τ_i) também impacta nesse processo, desacelerando-o. E assim o equilíbrio hidrodinâmico das duas camadas é dado pelas equações 18 e 19.

$$\frac{dp_2}{\rho_2 dx} + \frac{\tau_i}{\rho h_2} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{dp_1}{\rho_1 dx} = -v_1 \frac{dv_1}{dx} - \frac{\tau_i}{\rho h_1} \quad (19)$$

Onde:

τ_i : tensão de cisalhamento das interfaces;

v_1 : velocidade do escoamento de saída.

Considerando um estuário de profundidade h e largura b (não variáveis) e que $\rho_2 = \rho$ e $\rho_1 = \rho + \Delta\rho$; fazendo manipulações: subtraindo a equação (17) da (16); supondo que o declive inferior e o da cunha de sal sejam similares, o que resulta em $h_2 \approx h - h_1$; e usando a condição de continuidade, percebendo que $h_1 v_1 = hv = R/b$, onde R é a descarga do rio. Estes passos levam a uma equação diferencial não linear ordinária para a variável $y = \frac{h_1}{h}$:

$$(y^3 - F_i^2)(1 - y)dy = \frac{C_i F_i^2}{h} dx, \quad (20)$$

Onde:

F_i : número de Froude do rio;

C_i : coeficiente da tensão de cisalhamento.

$$F_i = v \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh \right]^{-1/2} = \frac{Q}{hb} \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh \right]^{-1/2} \quad (21)$$

Com as condições de limites da cunha salina conhecidas esta equação pode ser integrada. O limite do final da cunha salina seria: $y = 1$ e $x = L$, já os da fronteira do oceano são menos evidentes.

Durante a intrusão da água do mar a espessura da camada de água doce diminui e, conseqüentemente, a velocidade de saída (v_1) aumenta. No entanto, quando v_1 alcança a velocidade crítica (v_c), o processo de intrusão é paralisado. Nesse caso, o deslocamento para cima da interface não se propaga para montante.

A velocidade crítica (v_c) para a propagação à montante de uma perturbação na interface é dada por:

$$v_c = \left[\frac{\Delta\rho}{\rho} gh_1 \right]^{1/2} \quad (22)$$

Levando em consideração a lei da continuidade, temos $h_1 v_c = h v$ e as condições de contorno em $x = 0$; integra-se a equação diferencial, para uma descarga constante do rio, e se obtém a formula do comprimento da cunha salina estacionária:

$$L = \frac{20h}{c_i} \left(-10 + 15F_i^{\frac{2}{3}} - 6F_i^{\frac{4}{3}} + F_i^{-2} \right) \quad (23)$$

A partir disso, pode-se estipular o comprimento da cunha salina adimensional (L/h) como uma função do número Froude F_i . A Figura 2.9 apresenta essa função.

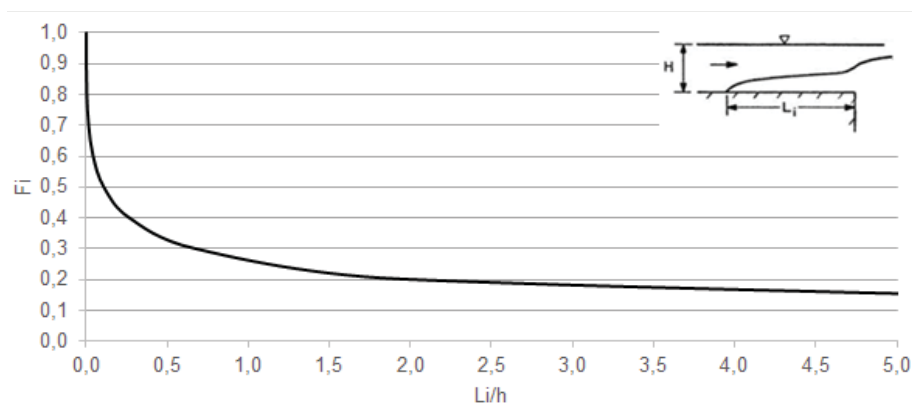


Figura 2.9 - Solução adimensional do comprimento da cunha em função do número de Froude.

No modelo Delft3D, para uma análise tridimensional, considera-se as coordenadas curvilíneas ortogonais na horizontal e as coordenadas σ na vertical. Também são adicionados os termos de fonte e sumidouro para simular descargas e retiradas (DELTARES, 2014a), como na Equação 24.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(d + \zeta)c]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [G_{\eta\eta} (d + \zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [G_{\xi\xi} (d + \zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} \\ & = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) \right\} + \frac{1}{(d + \zeta)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d (d + \zeta) c + S \end{aligned} \quad (24)$$

Onde:

D_H : coeficiente de difusão horizontal;

D_V : coeficiente de difusão vertical;

λ_d : processos de decaimento de primeira ordem;

S : termos de fonte e sumidouro por unidade de área;

c : concentração da massa.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para sistemas complexos (não uniformes e não permanentes) as soluções simplificadas não permitem uma análise representativa. Com os modelos numéricos é possível integrar e interpolar dados dispersos, podendo alimentar de informações áreas sem medições, e então moldando a característica física do local. A partir de então o modelo auxilia na previsão de cenários extraordinários, de impactos ocasionados por ações antrópicas, ou mesmo como monitoramento da ação natural do ecossistema.

Um trabalho relevante com modelagem é de Ayres (2015), trabalhou no desenvolvimento de um modelo numérico representante do delta do Rio Mississippi. Avaliou a intrusão de salinidade e sedimentação, utilizando o código Delft3D tridimensional, em observações em gráficos espaciais, seções e análises pontuais. O modelo reproduziu também os perfis de concentração de sedimentos finos em um ambiente de fluxo de cisalhamento totalmente turbulento. E também mensurou a contribuição do sedimento fino para o gradiente de densidade e o aumento resultante na força da estratificação.

Partindo para estudos aplicados à estuários brasileiros, Lacerda (2016) utilizou o mesmo modelo da Deltares, porém na baía de Vitória. Neste estudo o autor propôs dois cenários: um de referência, com cotas batimétricas anteriores ao projeto de dragagem; e um aprofundado, com batimetria do canal de acesso ao porto alusiva ao projeto de dragagem do Porto de Vitória. Com a diferença batimétrica, em média, de dois a quatro metros, Lacerda (2016) quantificou a interferência do aprofundamento de canais em estuários quanto ao comportamento das marés, correntes e sedimentos. Alcançou resultados de redução média de 0,03 m/s (20%) na magnitude da velocidade, com maior impacto na região aprofundada. A variação de maré foi menos impactada, com diferenças milimétricas. Já a concentração de sedimentos suspensos teve uma variação considerável, com redução média de 30%.

Tanto Ayres (2015), quanto Lacerda (2016) apresentam resultados provenientes do modelo Delft3D, os quais se mostraram eficientes e interessantes no ponto de vista científico. Destaque para as análises em perfil longitudinal de Ayres, que permite visualizar a estratificação sedimentar e a cunha salina. E foco também para as simulações de Lacerda em dois cenários, de referência e dragado. Ambos estudos estão próximos aos objetivos deste trabalho.

O Complexo Estuarino de Paranaguá já foi alvo de outras pesquisas relacionadas às características físicas do estuário. Os trabalhos de maior relevância estão listados na Tabela 2.1, onde também contém as respectivas especificações quanto ao tipo de análise, método utilizado e parâmetros analisados. Dentre esses trabalhos há de se destacar Miranda (2016), Mayerle et al (2015), Herrling (2003) e Noernberg (2001).

Tabela 2.1 – Principais estudos hidrodinâmicos no CEP

Autor(a)	Ano	Título	Características gerais		Dados considerados/avaliados					
			Modelo hidrodinâmico	nº de camadas malha	Tipo de malha	Hidrodinâmica	Sedimentologia	Salinidade	Temperatura	Meteorologia
Tamura, M.	2017	O Processo de Sedimentação no Canal de Acesso aos Portos do Complexo Estuarino de Paranaguá	SisBAHIA®	1	Curvilínea	4 pontos e 5 pontos e gráf. espacial	5 pontos e gráf. espacial	N/A	1 ponto	Vento
Miranda, T.	2016	Resposta da Hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá-PR a Sistemas Frontais.	Delft3D	10	Curvilínea	1 ponto	N/A	N/A	N/A	Vento
Mattos, E.	2016	Modelagem Hidrodinâmica da Dispersão da Pluma de Sedimentos Em Suspensão Oriundos de Atividades de Dragagem na Baía de Paranaguá e Antonina, PR	Delft3D	3	Curvilínea	gráf. espacial	gráf. espacial	N/A	N/A	N/A
Cunha, C.	2015	Uso de Técnicas de Modelagem Para Avaliar o Transporte de Sedimentos no Complexo Estuarino de Paranaguá	SisBAHIA®	1	Curvilínea	5 pontos e gráf. espacial	3 pontos e gráf. espacial	N/A	N/A	Vento
Mayerle, R.	2015	A Case Study of Sediment Transport in the Paranaguá Estuary Complex in Brazil	Delft3D	1	Regular	10 pontos, 4 pontos e 2 seções, gráf. espacial	4 pontos e gráf. espacial	3 pontos	N/A	Vento
Ribas, T.	2004	Implementação de Modelo Numérico Para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina E de Paranaguá - PR	Delft3D	3	Curvilínea	gráf. espacial	N/A	gráf. espacial	gráf. espacial	Vento
Herring, G.	2003	Development Of A Numerical Model For the Paranaguá Bay in Brazil	Delft3D	1	Curvilínea	gráf. espacial	gráf. espacial	N/A	N/A	Vento
Noernberg, M.	2001	Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá - Paraná - Brasil: Um Estudo a Partir de Dados In Situs e Landsat-Tm	Trabalho a partir de amostragens		Pontos no decorrer de 2 seções					N/A
Camargo, R.	1998	Estudo Numérico das Circulações Atmosférica e Oceânica na Região da Baía de Paranaguá	POM	11	Regular	5 pontos	N/A	N/A	N/A	Vento

No modelo tridimensional de Mayerle et al. (2015) foi analisado a influência de vento, ondas e marés no transporte de sedimentos. Onde os resultados das simulações referentes a concentração e movimentação de sedimentos no interior do estuário foram condizentes aos dados observados. O autor ressalta que dragagens no canal portuário afetam o comportamento morfológico no CEP e que mais estudos devem ser feitos para a avaliação dos impactos no regime de transporte de sedimentos do local.

Miranda (2016) analisou a resposta da hidrodinâmica do CEP na presença de um evento de frente fria. Com modelagem dos campos de vento avaliou um cenário no inverno e outro no verão. As respostas desse modelo subsidiaram forçantes de velocidade e direção do vento nas simulações da hidrodinâmica do CEP, através do Delft3D. Através de testes de sensibilidades Miranda (2016), observou que a maré é fator predominante nas variações de níveis do estuário, mas destaca a importância das demais componentes (ação das ondas, rios, ventos e pressão). Nos dois cenários o campo de correntes aponta mudanças de direções após a entrada da frente fria, que passam a seguir a direção do sistema frontal, ao Norte. Observou também que o principal efeito ocorrido desses eventos foi o bombeamento de água para o interior do estuário, devido ao efeito de Coriolis associado à direção predominante dos campos de vento. A grade curvilínea utilizada pela autora foi adaptada para o presente trabalho.

Em 2003, Herrling, também através do modelo hidrodinâmico da Deltares, desenvolveu um modelo para o CEP. O autor avalia a influência da resolução da grade, do vento, do espaço de tempo adotado, da rugosidade e viscosidade. Por fim apresenta a melhor resposta do modelo para cada um desses parâmetros, o que serviu para agregar como parte dos dados de entrada do modelo da presente pesquisa.

Outro trabalho no CEP que merece destaque é o de Noernberg (2001), onde, através de dados *in situs* e imagens *Landsat*, avaliou diversos parâmetros no decorrer de 27 meses. Noernberg (2001) definiu dois transectos de amostragem, representando os dois principais eixos do estuário. Esses pontos de amostragem foram analisados quanto a: salinidade; temperatura; densidade; velocidade e direção de corrente; turbidez; material particulado em suspensão (MPS); clorofila; substâncias húmicas; e profundidade do disco de Secchi. Alguns desses parâmetros medidos

foram utilizados no presente trabalho como condições iniciais na modelagem computacional.

Fenômenos naturais e obras humanas, interferem nas características físicas do estuário. A modificação do leito, por exemplo, em cenários de dragagens, causa modificação na hidrodinâmica e nos processos morfológicos, podendo alterar os regimes de correntes e os parâmetros físicos de salinidade e temperatura. Analisando os efeitos de diferentes forçantes sobre a área de estudo, é possível avaliar as consequências nas características físicas do estuário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito o modelo hidrodinâmico utilizado nesse trabalho (Delft3D), em seguida a área de estudo será caracterizada, e, encerrando, a aplicação da modelagem na área de estudo será abordada.

3.1 MODELO NUMÉRICO DELFT3D

O sistema de modelagem Delft3D foi desenvolvido pela Deltares, na Holanda, e tem o objetivo de analisar multidisciplinarmente zonas costeiras, lagos, rios e estuários. Integrando diferentes módulos, permite simulações hidrodinâmicas através de: fatores de maré; gradientes de vento; densidade; correntes e propagação de ondas; advecção e dispersão de efluentes; evolução morfológica; transporte de sedimentos; modelagem de qualidade de água; e processos ecológicos. Sendo possível simular variações temporais, espaciais e a interconectividade entre eles.

O software conta com ferramentas de pré-processamento, tais quais: o gerador de grade RGFGRID; e o gerador de batimetria QUICKIN. Com diversos módulos compondo o Delft3D o programa aborda diferentes focos de simulação: hidrodinâmica (FLOW), ondas (WAVE), transporte de sedimentos (SED), qualidade da água (WAQ), morfologia (MOR), monitoramento da partícula (PART) e processos ecológicos (ECO). O pós-processamento utiliza a plataforma MATLAB e trabalha com duas ferramentas, o GPP e o QUICKPLOT (Deltares, 2014).

3.1.1 Módulo para Geração da Grade Numérica – RGFGRID

O software dispõe de dois tipos de grade, a retangular e a curvilínea. Por possibilitar maior precisão no seu contorno, a grade curvilínea é a mais indicada para aplicações em estuários, onde as equações são formuladas em coordenadas ortogonais curvilíneas.

O Delft3D é um modelo numérico baseado em diferenças finitas e adota o sistema de grade staggered. As variáveis que descrevem o fluxo, o nível d'água e as componentes de velocidade (u , v , w), são distribuídas na grade Arakawa-C. Onde os pontos de pressão estão definidos no centro da célula e as componentes da velocidade perpendiculares aos lados das células, como representado na Figura 3.1.

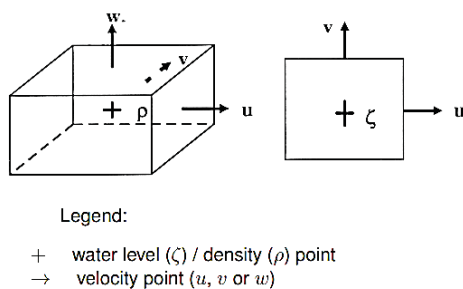


Figura 3.1 – Distribuições dos pontos de pressão e componentes da velocidade na grade Arakawa-C
Fonte: Deltares, 2014.

Em modelos tridimensionais o módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW usa o sistema de coordenadas sigma (σ) ou o sistema de coordenadas Z (Figura 3.2). No primeiro o eixo vertical é analisado para camadas limites definidas por planos σ , onde o número de planos é o mesmo por toda a área de estudo, independentemente da profundidade. Sendo assim as espessuras das camadas desses planos variam com a batimetria e com o nível da água no domínio; e são definidas por percentuais de participação no eixo vertical através da seguinte formulação:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (25)$$

Onde:

z : distância entre o nível d'água e o leito (m);

ζ : elevação do nível d'água, acima do plano de referência z (m);

d : profundidade abaixo do plano de referência (m);

H : profundidade local total (m).

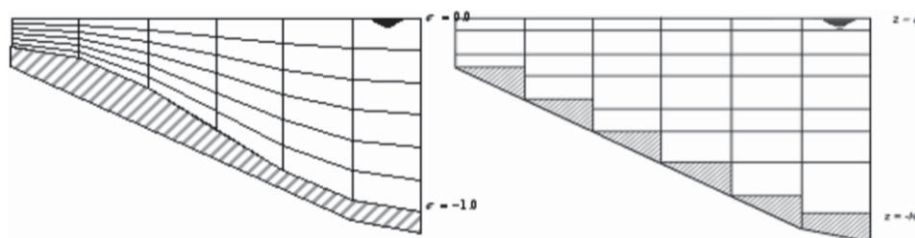


Figura 3.2 – Modelo de coordenadas verticais: σ , a esquerda; e Z, a direita.
Fonte: Deltares, 2014.

3.1.2 Módulo Hidrodinâmico - FLOW

O módulo hidrodinâmico (FLOW) simula escoamentos (permanentes e não permanentes), fenômenos de transporte resultantes de marés, descarga de água, efeitos meteorológicos e diferenças de densidade (causados por gradientes horizontais dos campos de salinidade e temperatura). Pode ser aplicado em marés, regiões costeiras, estuários, reservatórios e rios, de forma bidimensional ou tridimensional. Onde a primeira é indicada para áreas rasas e a segunda, simulações tridimensionais, para escoamentos mais profundos.

O módulo FLOW baseia-se nas equações horizontais de movimento, equação da continuidade e de transporte para constituintes conservativos, além de resolver as equações de Navier Stokes para fluidos incompressíveis. As equações apresentadas no Capítulo 2 – Revisão de Literatura – consideram os seguintes fatores:

- Efeito de maré nas fronteiras abertas;
- Força de Coriolis;
- Fluxos turbulentos de massa e momento;
- Efeitos barotrópicos e baroclínicos;
- Transporte de substâncias conservativas (sal, calor, etc.);
- Tensão de cisalhamento do vento na superfície livre;
- Fluxo de calor através da superfície livre;
- Variação de pressão atmosférica na superfície livre;
- Dissipação de energia pelo atrito com o fundo;
- Tensão de cisalhamento nas bordas;
- Evaporação e precipitação;
- Descarga fluvial;
- Difusão de momento na vertical provocado por ondas internas;
- Fluxos através de estruturas hidráulicas;
- Tensão de cisalhamento nas paredes.

No caso de estuários o modelo é forçado pelos harmônicos de maré e pelas descargas fluviais nas fronteiras abertas. A ação do vento influencia na superfície livre através de gradientes de pressão, gradientes de densidade, campo barotrópico e baroclínico.

O módulo hidrodinâmico do modelo resolve a equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível; considera aceleração vertical desprezível, com relação à gravidade, o que possibilita a simplificação da equação momento para relação hidrostática no campo de pressão. Assim as velocidades verticais se originam da equação da continuidade.

Quanto à velocidade horizontal as equações podem ser formuladas em coordenadas cartesianas retangulares, ortogonais curvilíneas ou em coordenadas esféricas. No sistema de coordenadas curvilíneas, a superfície livre e a batimetria têm como referência um plano horizontal, enquanto que em coordenadas esféricas o plano de referência segue a curvatura da Terra. As grades curvilíneas também se adaptam melhor ao representar contornos de rios, estuários e costas, que em geral são curvos. Nestes casos, o uso de uma grade retangular torna o contorno irregular, introduzindo erros significantes.

3.1.3 Programa de Pós-Processamento - QUICKPLOT

O programa de pós-processamento do modelo QUICKPLOT oferece opções gráficas para a apresentação dos resultados das simulações. Elas podem ser observadas em pontos específicos ou em gráficos espaciais.

As séries históricas, mostram em um ponto gráficos de parâmetros rastreados ao longo do período, como nível da água, velocidades e concentração. Já nos gráficos espaciais os resultados são obtidos em toda a superfície da grade, podendo avaliar nível da água, vetores de velocidade, batimetria e diversas outras características físico-químicas do corpo d'água.

As representações espaciais podem ser em tempo definido, onde a representação é estática, e em tempo variável. Neste caso o programa gera animações de séries históricas da área simulada, podendo observar a constante variação dos parâmetros avaliados, como níveis, velocidades, concentrações, manchas de óleo ao longo do tempo, etc.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP)

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) está localizado em uma região de grande importância socioeconômica e ambiental, onde abriga o Porto de Paranaguá. Sendo um dos principais portos graneleiros da América Latina, está inserido na Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaraqueçaba.

O CEP tem características clássicas de estuário parcialmente misturado, sendo um corpo aquático que recebe influências tanto dos oceanos, quanto dos rios, e também de variações climáticas. Essa natureza causa intensas movimentações de água e sedimentos, as quais são ainda mais afetadas pela geometria e batimetria do estuário (MIRANDA, 1990).

Compreendido em uma área de 612 km², o CEP está localizado no litoral do estado do Paraná (Figura 3.3) e é composto pela baía das Laranjeiras e pela baía de Paranaguá e Antonina (Figura 3.4). Possui 56 km de extensão no eixo Leste-Oeste e 30 km de extensão no eixo Norte-Sul. (LAMOUR et al, 2004; MAYERLE et al, 2015).

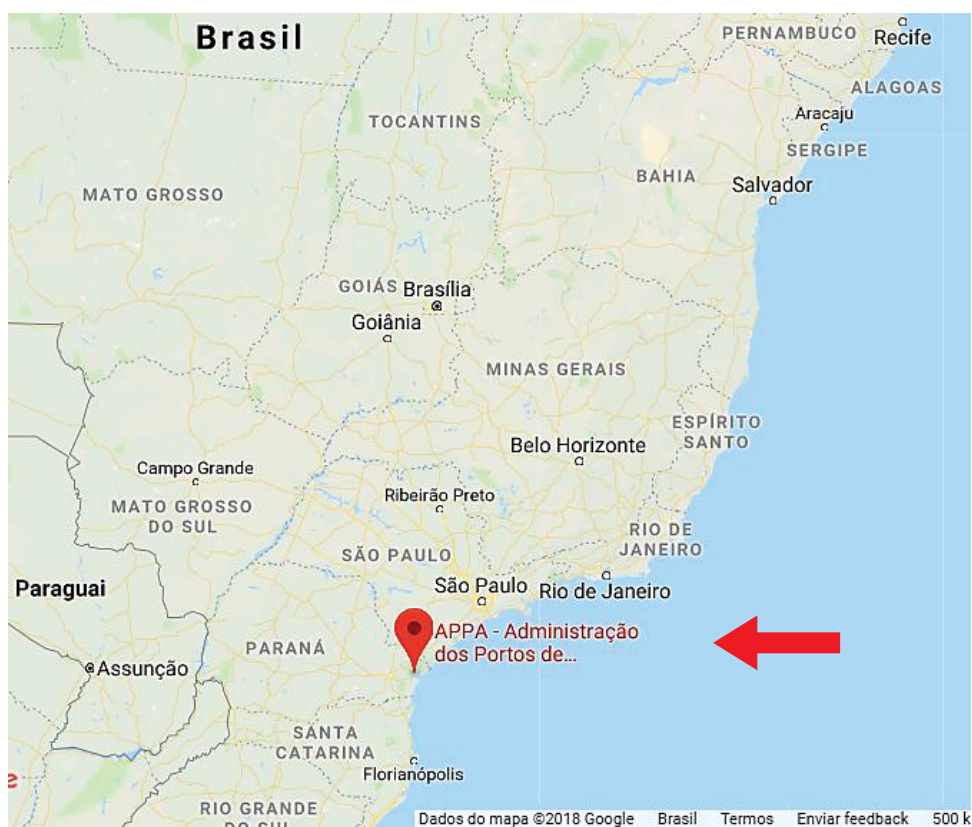


Figura 3.3 – Localização do Porto de Paranaguá no Brasil

Fonte: Google maps, 2018

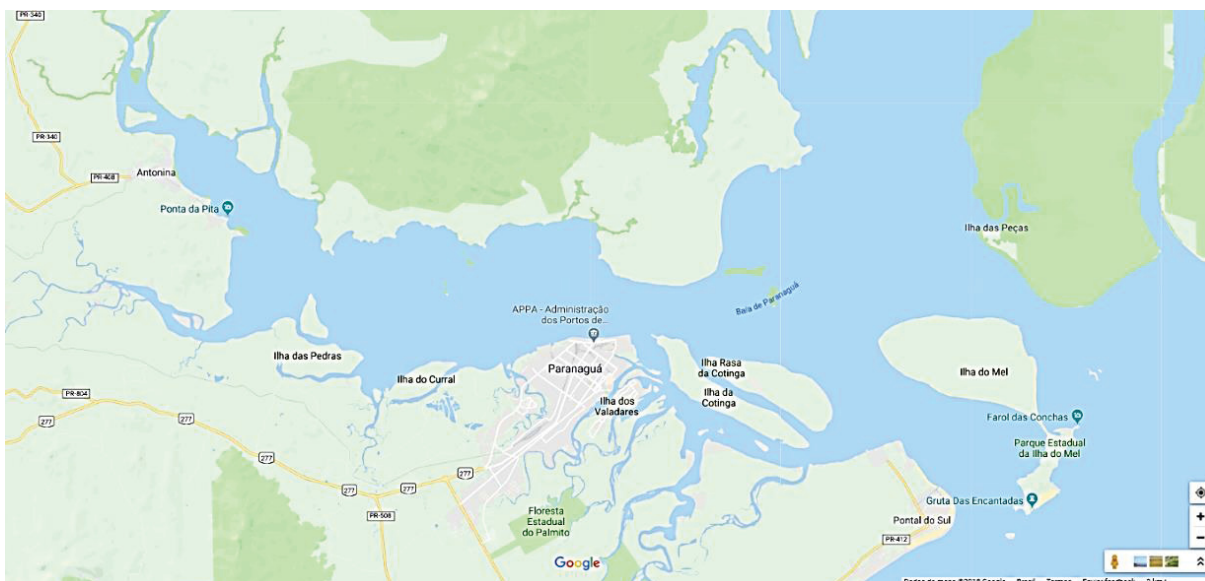


Figura 3.4 – Baía de Paranaguá e Antonina

Fonte: Google maps, 2018

O Porto de Paranaguá é gerido pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (Appa) e está localizado na margem sul da baía de Paranaguá. É considerado um dos principais portos exportadores de granéis do Brasil, atendendo as demandas de exportação e importação dos estados do Paraná e parte dos estados de São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rondônia, além do país vizinho, Paraguai, que dispõe de um armazém no Porto.



Figura 3.5 - Localização dos Berços e Píeres do Porto de Paranaguá

Fonte: Google Earth; adaptado por LabTrans

O acesso marítimo é feito pelo Canal da Galheta, definida nas Cartas Náuticas de Marinha nº 1.821 e nº 1.822, com largura de até 200 metros, 20 milhas de extensão e profundidade de 13 a 15 metros. Os calados operacionais para os berços do Porto de Paranaguá foram disponibilizados pela Appa, conforme a Tabela 3.1 (Appa, 2018).

Tabela 3.1 – Calado operacional conforme o berço de atracação no Porto de Paranaguá

Calado operacional (m)	
B201 Cabeços 5 ao 13	11,3
B202 Cabeços 14 ao 20	10,7
B203/B204 Cabeços 21 ao 25	11,3
B205 Cabeços 26 ao 32	10,1
B206/B207 Cabeços 33 ao 42	10,1
B208 Cabeços 42 ao 48	8,8
B209/B210 Cabeços 49 ao 58	10,7
B211 Cabeços 59 ao 64	10,8
B212 Cabeços 65 ao 75	12,5
B213 Cabeços 76 ao 85	12,5
B214 Cabeços 86 ao 93	12,5
B215 Cabeços 94 ao 102	11,5
B216 Cabeços 103 ao 118	11,5
B217 Cabeços 119 ao 134	11,5
B218 Dolphins	9,5
Inflamáveis int.	10,1
Inflamáveis ext.	11,6
Cattalini interno	10,0
Cattalini externo	12,0
Fospar interno	9,2
Fospar externo	12,0
TPPF Diurno	9,0
TPPF Noturno	7,0
Barão de Teffé	5,8
Terminal Matarazzo	5,8
Canal da Galheta	12,5

Fonte: Appa, 2018

O Complexo Estuarino de Paranaguá é classificado; entre os tipos de estuários apresentados no capítulo anterior; como Parcialmente Misturado, com estratificação vertical de salinidade realçada no verão (MANTOVANELLI, 1999). As distribuições de propriedades, na vertical e na horizontal, não são homogêneas, contudo ao comparar as estações secas e chuvosas na região há uma variação do padrão de circulação e de estratificação.

No estuário em questão a salinidade oscila entre 12 e 29 psu e a temperatura entre 23 e 30 °C no verão. Já no inverno a salinidade fica entre 20 e 34 psu e a temperatura entre 18 e 25 °C.

Os diversos rios que deságuam no CEP possuem nascentes na Serra do Mar, sendo os principais o rio Cachoeira e o rio Nhundiaquara. Por ser uma região serrana,

com alta declividade, apresenta instabilidade quanto ao potencial erosivo desses rios. As correntes de vazante são de 10 a 15% maiores do que as de enchente, isso porque recebem influência dos atritos lateral e de fundo, nas quais as ações são maiores conforme a proximidade da cabeceira (CAMARGO, 1998). No inverno a bacia hidrográfica do CEP sofre influência com a deficiência hídrica e, em contrapartida, com o excedente hídrico no verão; o que eleva ainda mais o potencial de erosividade destes rios (NOERNBERG, 2001).

No litoral paranaense a variação da maré é inferior a dois metros em períodos de sizígia (MARONE et al. 1995). Em condições normais as componentes de maré dominam a circulação estuarina paranaense. A principal componente de maré na baía de Paranaguá possui amplitudes de até 0,49 metros em Antonina, e se amplificam em cerca de 50% relacionando à desembocadura. A defasagem temporal nas preamares e baixa-mares entre as áreas internas e a área costeira chega a 0,85 h (LOPES, 2010).

O efeito do vento é particularmente importante na geração de marés meteorológicas. Os quais podem interferir significativamente nas correntes residuais de maré, tanto na zona costeira como no interior da baía. Segundo Noernberg (2001) estas marés promovem aumentos do nível do mar no interior do complexo estuarino de até 0,80 m.

3.2.1 APLICAÇÃO DO MODELO DELFT3D

Para a implementação do modelo hidrodinâmico Delft3D na região de estudo foi necessário um pré-processamento, gerando uma grade numérica que representasse o CEP. Em seguida foi feita a interpolação de dados batimétricos para a grade gerada.

A grade curvilínea desse trabalho teve sua base originária de Miranda (2016) recebendo posteriormente alguns ajustes e otimizações. Ela é composta por 217 pontos na direção M e 302 na direção N, com 10 camadas na vertical, as quais têm as espessuras definidas em percentual de participação na profundidade. Seguindo as recomendações da Deltares, 2014, aplicou-se camadas maiores na superfície, diminuindo a espessura progressivamente na aproximação com o leito. A representatividade das espessuras das camadas, partindo da superfície (*layer 1*) até o fundo (*layer 10*), foram definidas em: 20%; 20%; 15%; 12%; 10%; 8%; 6%; 4%; 3%; e 2%.

O intervalo de tempo foi fixado em 1 minuto, de modo a garantir a qualidade da grade. As séries históricas foram obtidas de 10 em 10 minutos, sendo o suficiente para o confronto com os dados medidos. Já o intervalo para os resultados em gráficos espaciais e em seções foram de 120 minutos, o necessário para a identificação do regime diário de correntes.

A rugosidade foi inicialmente estimada de acordo com Gerald (2003), o qual, através de modelagem no Delft 3D, avalia diferentes valores de rugosidade (45, 75, 90 e 100 $m^{1/2}/s$), comparando com os níveis de maré medido, onde os melhores resultados foram para valores de Chézy de 90 $m^{1/2}/s$. Nas simulações do presente trabalho o valor do coeficiente uniforme que melhor representou o modelo foi para Chézy = 85 $m^{1/2}/s$, o qual foi adotado para todas as simulações.

Noernberg (2001) utilizou diversos pontos de medições e obteve alguns parâmetros físicos do CEP, subsidiando parâmetros de dados de entrada, como densidade, salinidade e temperatura. Algumas especificações da grade utilizada no modelo e os parâmetros físicos adotados estão presentes na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados na modelagem hidrodinâmica do CEP, pelo Delft3D.

Grade - Sistema de coordenadas cartesianas	
Número de pontos na direção M	217
Número de pontos na direção N	302
Número de camadas	10
Espessura das camadas (%)	20; 20; 15; 12; 10; 8; 6; 4; 3; 2
Intervalo de tempo	1 min
Intervalo histórico	10 min
Início da simulação	01/10/2013 00:00
Final da simulação	31/10/2013 00:00
Condições de contorno	Maré e 5 descargas fluviais
Parâmetros físicos	
Gravidade	9,81
Densidade da água	1020 kg/m^3
Rugosidade Uniforme, por Chézy	$U = V = 85 m^{1/2}/s$
Viscosidade turbulenta horizontal	0,1 m^2/s
Difusividade horizontal	1 m^2/s
Viscosidade turbulenta vertical	0 m^2/s
Condições iniciais	
Nível médio da água	0 m
Salinidade	20 psu
Temperatura	23 °C

A Figura 3.6 apresenta a grade gerada para a modelagem da área do CEP, já refinada para os locais de interesse e ortogonalizada. Nela também estão apontadas as condições de contorno consideradas. Na região da baía de Antonina: os rios Cachoeira, Faisqueira e Nhundiaquara; pouco mais ao sul o rio Guaraguacu; na baía de Guaraqueçaba o rio Tagaçaba; e também o Oceano.

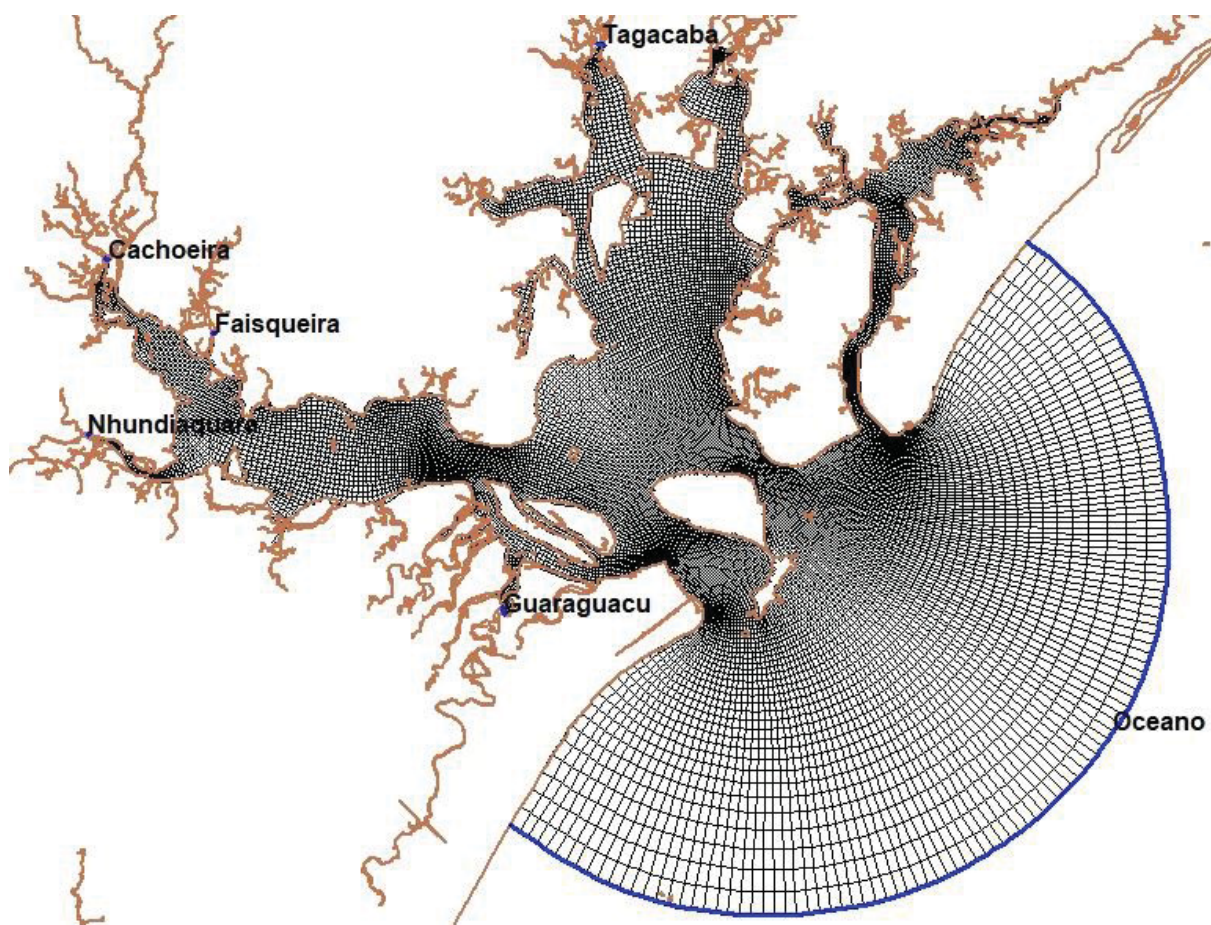


Figura 3.6 – Grade numérica e condições de contorno aplicados na região de estudo.

Como condições de contorno utilizou-se séries temporais com vazão total de 01/10/2013 a 31/10/2013 para os cinco rios e harmônicos da maré. As vazões dos rios utilizadas no modelo foram de acordo com as vazões médias dos cinco rios – para o mês de outubro – apresentadas pelo portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas. As principais componentes harmônicas da maré foram modeladas por Harari e Camargo (1994) que, através do processamento do modelo numérico hidrodinâmico POM, simularam as componentes de maré na plataforma sul e sudeste brasileira (do litoral norte de SC até a região de Cabo Frio - RJ), se estendendo da costa até a isóbata de 100m. Sendo possível prever as elevações e as correntes de maré, em

locais e períodos específicos. Os parâmetros utilizados nas condições de contorno para a modelagem desse trabalho estão presentes na Tabela 3.3; e na Tabela 3.4 as constantes harmônicas são detalhadas.

Tabela 3.3 – Parâmetros de entrada das condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

	Rios				
	Nhundiaquara	Cachoeira	Guaraguaçu	Faisqueira	Tagaçaba
Vazão (m ³ /s)	25,05	52,27	8,00	10,43	10,51
Temperatura (°C)	22,90	22,90	22,90	22,90	22,90
Salinidade (psu)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 3.4 – Principais componentes harmônicas de maré para o CEP.

Componente	Plataf_End_A		Plataf_End_B	
	Amplitude (m)	Fase (Graus)	Amplitude (m)	Fase (Graus)
M2	0,35591685	73,577630	0,37131153	76,884886
S2	0,23806400	81,148271	0,24747085	88,138833
O1	0,11701403	78,142759	0,11728800	83,169803
K1	0,04142129	139,415640	0,06994921	84,334625
K2	0,05870470	74,200370	0,04130506	144,331460
N2	0,02355366	141,775120	0,01982451	145,958440
M4	0,03186550	129,611740	0,04936496	145,428850
Q1	0,02895026	53,016640	0,02948173	57,187867
P1	0,02088354	130,139140	0,02104418	134,774110
MF	0,00364062	329,784600	0,00408659	332,252630
MM	0,00322809	346,338100	0,00359256	347,897830
Salinidade na superfície (psu)		Salinidade no fundo (psu)		Temperatura (°C)
28,48		29,95		23,31

A partir da grade numérica e de dados batimétricos – obtidos através da digitalização das cartas náuticas 1820, 1821 e 1822 e de dados obtidos com *ecosounder* – a batimetria da região foi interpolada por triangulação linear, no módulo QUICKIN, do Delft3D. A Figura 3.7 apresenta a batimetria gerada em toda a área de estudo modelada e o ponto de observação (Entrance), que corresponde ao ponto do marégrafo instalado nas proximidades, para medição de nível.

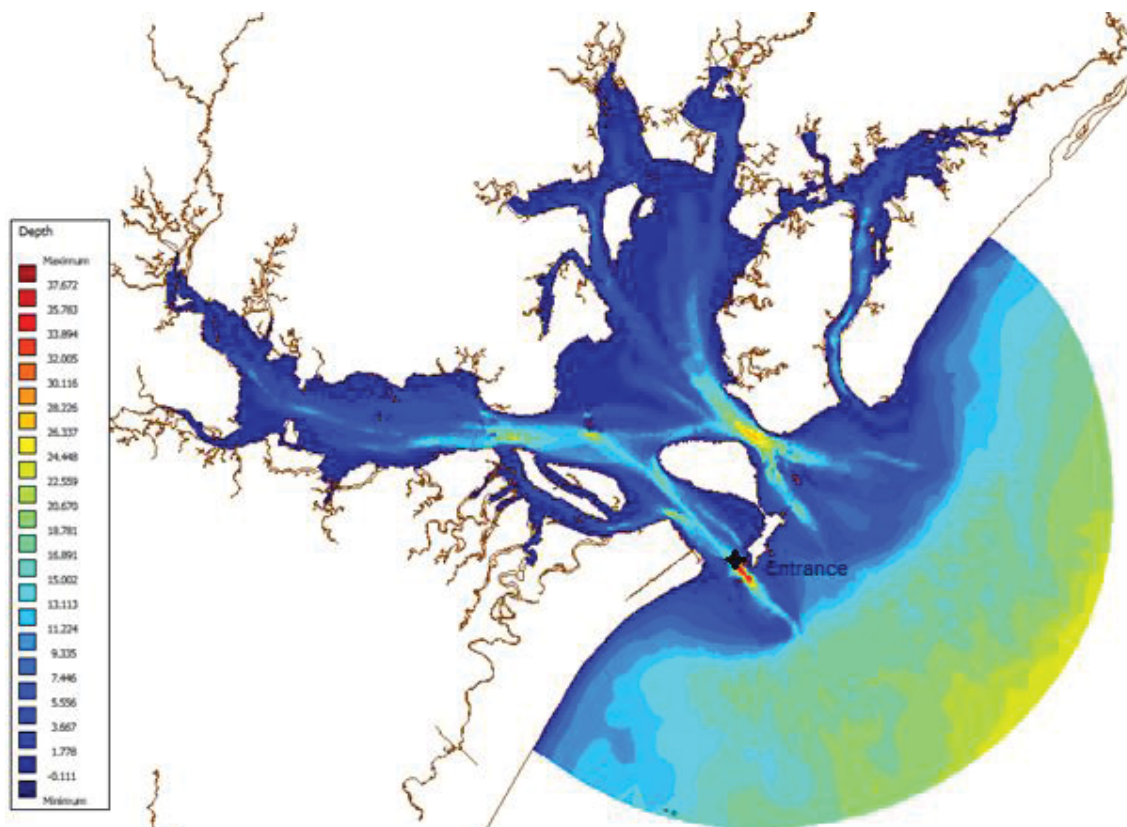


Figura 3.7 – Batimetria gerada no modelo após interpolação triangular.

Para validar o modelo foram utilizados dados de maré na entrada do canal portuário, próximo à ilha do Mel, podendo comparar os resultados do modelo ao dados medidos.

Ao possuir o modelo calibrado e validado, foram simuladas variações de batimetria, que simulam dragagens no canal portuário. A variação da profundidade do estuário pode interferir significativamente na hidrodinâmica do local e consequentemente no processo sedimentológico, variação de salinidade e de temperatura. Assim esses parâmetros físicos foram agregados ao modelo como dados iniciais e então avaliados quanto interferência proveniente da dragagem.

Para uma simulação adequada, o modelo sugere a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy. Esse parâmetro adimensional é determinado pela definição do passo de tempo, acoplado aos dados de espaçamentos da grade, e profundidade. No manual do software Delft3D aconselha-se que o número de Courant (Cr) não seja superior a dez; e é calculado pela seguinte equação:

$$Cr = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad (26)$$

Onde:

Δt : Passo de tempo (s);

$\{\Delta x, \Delta y\}$: Espaçamento mínimo da grade na direção x e y (m);

g: Aceleração da gravidade $m.s^{-2}$;

H: Profundidade total (m).

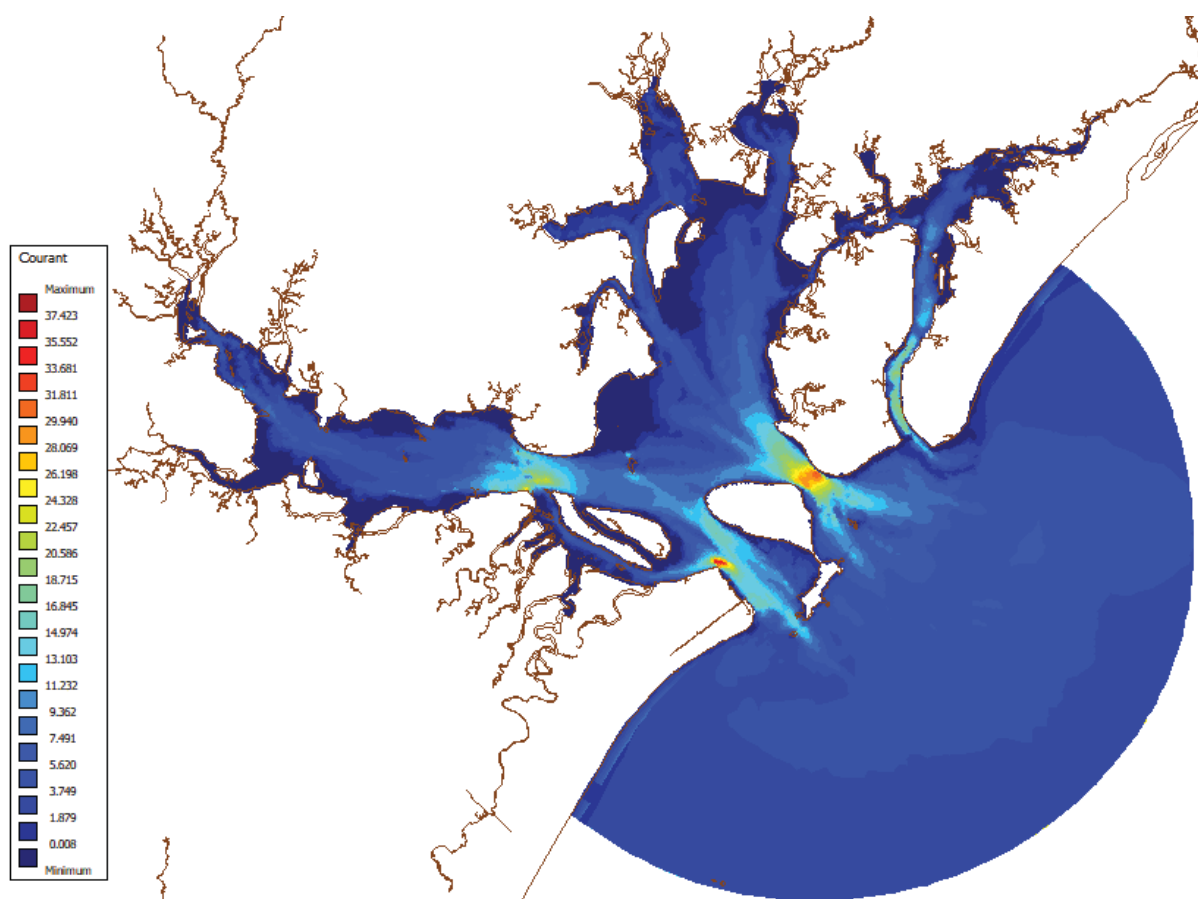


Figura 3.8 – Número de Courant no modelo hidrodinâmico do CEP – com *timestep* = 60.

O espaço de tempo inicialmente escolhido foi de 120 segundos, contudo o número de Courant atingia valores muito além do aconselhável. Assim esse tempo foi reduzido a 60 segundos, amortizando o parâmetro de Courant em toda a malha pela metade.

A qualidade da grade depende diretamente do arranjo das células. As propriedades que mais influenciam nessas características são: a resolução; a ortogonalidade; e a suavidade.

A resolução da grade é calculada célula a célula, pela raiz quadrada da sua respectiva área. Os valores menores devem aparecer nas áreas de maior interesse

no estudo, o que significa resultados mais precisos. Já para áreas marginais, o refinamento não se faz tão necessário e a distância entre os pontos centrais de cada célula pode ser maior; economizando tempo computacional (DELTARES, 2014). A Figura 3.9 apresenta a resolução adquirida da grade utilizada nesse estudo.

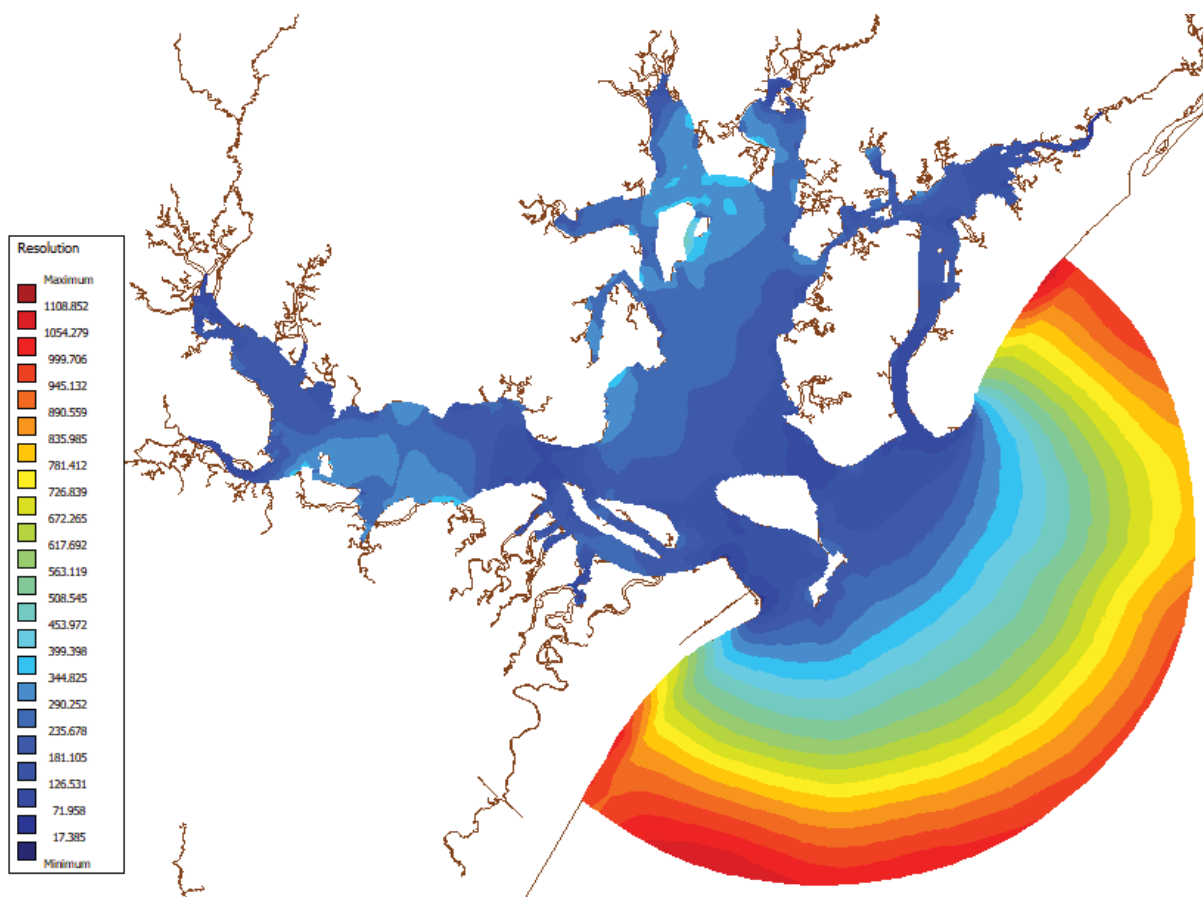


Figura 3.9 – Resolução (m) da grade numérica para o CEP.

Outro parâmetro a se identificar é a ortogonalidade, quanto mais próxima de zero otimiza-se os termos de transformações computacionais que possam ser custosos para a máquina. A ortogonalidade é obtida pelo ângulo (φ) entre as linhas de grade nas direções M e N. Sugere-se que os valores do cosseno do ângulo entre as linhas de grade entre 0,02 e 0,04 (DELTARES, 2014). A Figura 3.10 apresenta a ortogonalidade adquirida da grade utilizada nesse estudo.

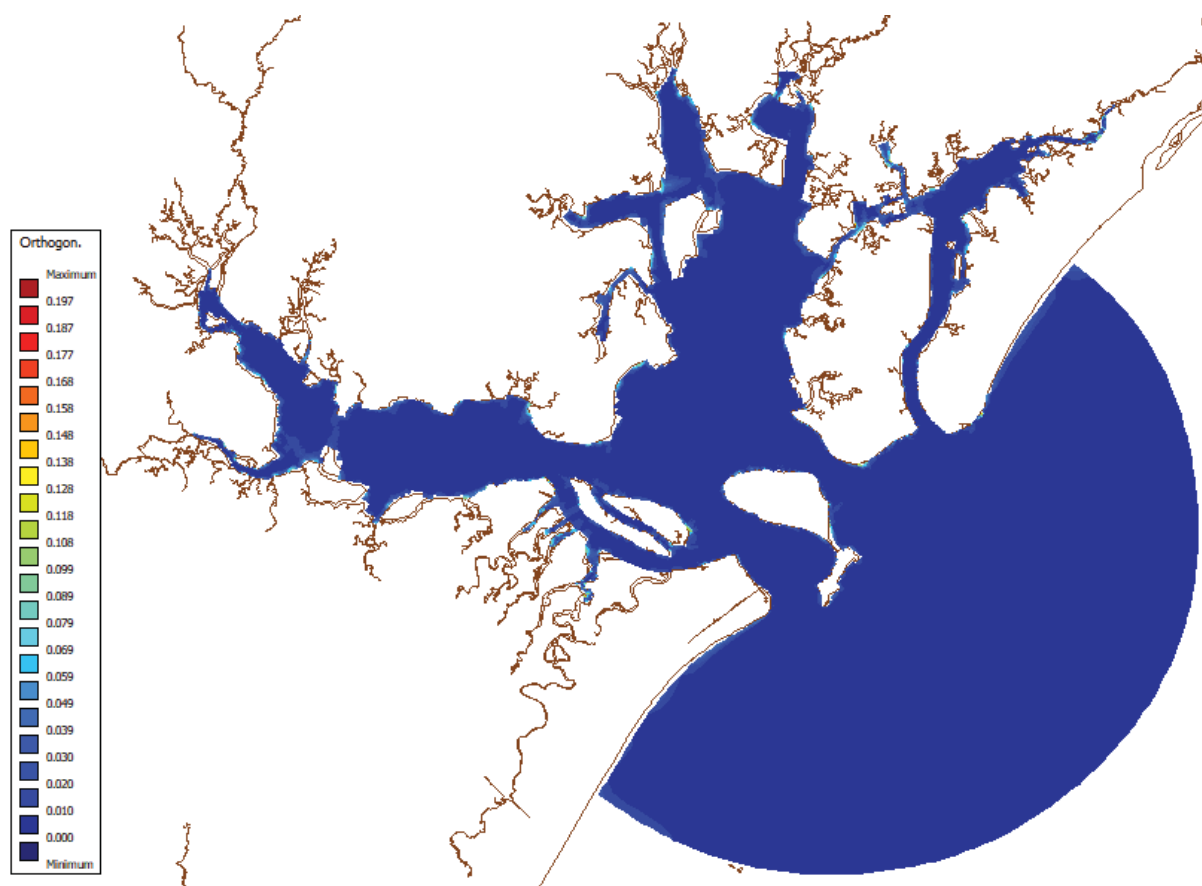


Figura 3.10 – Ortogonalidade ($\cos \varphi$) da grade numérica para o CEP.

A ortogonalidade da malha gerada foi ajustada ainda no RGFGRID, que possibilita o comando de ortogonalização automática, atendendo bem às indicações da Deltares. Com exceção de poucas células nos contornos da grade, todas apresentaram valores menores do que os sugeridos.

A suavidade também pode ser avaliada e é a proporção entre os comprimentos das células vizinhas. Essa diferença deve ser pequena a fim de minimizar erros nas aproximações do método de diferenças finitas. Sugere-se que os valores sejam inferiores a 1,2 nas áreas de interesse, e a 1,4 nas áreas mais afastadas (DELTARES, 2014). A grade gerada nesse modelo atendeu a esse quesito.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Na grade do modelo deste trabalho e para os parâmetros físicos adotados, foi feita a calibração em modelo bidimensional, avaliando três componentes harmônicas distintas. A primeira, utilizada por Miranda (2016), onde a autora acopla aos dados de maré fatores de correções. Nessa simulação 1 a oscilação do nível calculado ficava muito aquém do medido. Com os dados de maré utilizados por Herrling (2003), apesar de atingir amplitudes um pouco mais próximas – para essa modelagem, os dados estatísticos não foram adequados. A terceira simulação foi com os mesmos dados de Miranda (2016), contudo desconsiderando as correções das componentes astronômicas.

Para a verificação da eficiência do modelo, cinco parâmetros estatísticos foram considerados: erro médio; desvio padrão; erro médio absoluto; erro quadrático médio; e coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Este último foi proposto por Nash e Sutcliffe, em 1970, e é considerado um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (MACHADO & VETTORAZZI, 2003). O NSE é calculado da seguinte forma:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0 - Q_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0 - \bar{Q}_0)^2}$$

Onde:

Q_0 : Variável observada;

Q_m : Variável estimada pelo modelo;

\bar{Q}_0 : Variável média observada;

T : Número de dados do evento.

O coeficiente varia entre $-\infty$ e 1, sendo 1 o indicativo de ajuste perfeito (ASCE, 1993). Valores de NSE maiores do que 0,75 indicam bom desempenho dos modelos; entre 0,36 e 0,75 o desempenho é aceitável; e NSE inferiores a 0,36 aponta insuficiência do modelo.

A terceira simulação apresentou resultados mais confiáveis, com erro médio pouco maior do que as duas primeiras simulações, porém com o melhor coeficiente de Nash-Sutcliffe, a cima de 0,75.

Com resultados estatísticos satisfatórios, conservou-se as componentes de maré da simulação 3, e partiu-se para o modelo tridimensional. Para a primeira resposta foi imposto um passo de tempo relativamente alto, de 120 segundos e os valores estatísticos no modelo tridimensional foram ainda melhores. Contudo, com o modelo nessas especificações, a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy não estava próxima de ser atendida. Reduziu-se o passo de tempo para 60 segundos e obteve-se resultados estatísticos similares, com coeficiente de Nash pouco aquém de 0,75.

A Tabela 4.1 resume os resultados estatísticos avaliados nas cinco simulações feitas na grade gerada, de acordo com a dimensão do modelo e com as referências das constantes harmônicas utilizadas.

Tabela 4.1 – Dados estatísticos das 5 simulações.

	Características das grades e constantes harmônicas	Referência das componentes astronômicas	Erro médio	Desvio padrão	Erro médio absoluto	Erro quadrático médio	Nash-Sutcliffe
1	2D com correção astronômica <i>timestep</i> = 60s	Miranda, T (2016)	0,0043	0,2148	0,1732	0,2148	0,5590
2	2D <i>timestep</i> = 60s	Herrling, G (2003)	0,0025	0,4970	0,4047	0,4969	-0,6309
3	2D sem correção astronômica <i>timestep</i> = 60s	Miranda, T (2016)	0,0079	0,2004	0,1549	0,2006	0,7829
4	3D sem correção astronômica <i>timestep</i> = 120s	Miranda, T (2016)	-0,0004	0,2035	0,1580	0,2034	0,7437
5	3D sem correção astronômica <i>timestep</i> = 60s	Miranda, T (2016)	0,0004	0,2078	0,1611	0,2077	0,7032
6	3D sem correção astronômica <i>timestep</i> = 60s + 2 rios no contorno	Miranda, T (2016)	-0,0009	0,2054	0,1592	0,2054	0,7209

Às cinco simulações o nível de água simulado foi comparado ao observado no mesmo período e no mesmo ponto (“Marégrafo”), na entrada do Canal da Galheta (Figura 4.1). Observa-se que os modelos foram capazes de simular a mesma fase de maré apresentada pelo marégrafo, contudo algumas amplitudes foram inferiores aos dados observados. As altas oscilações da maré estão relacionadas às marés meteorológicas, o que justifica as diferenças entre dados medidos e simulados, uma vez que condições meteorológicas não foram consideradas neste modelo.

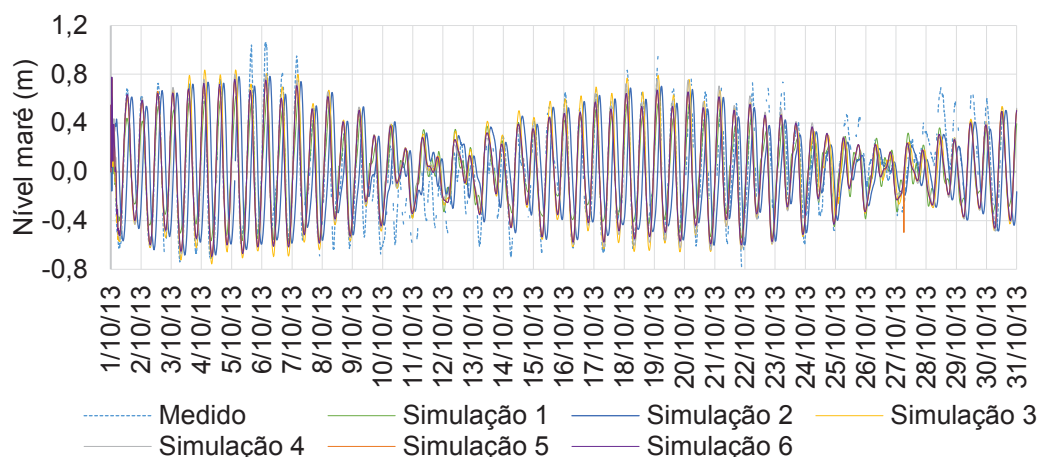


Figura 4.1 – Nível de maré medido e simulados, na entrada do canal portuário.

Miranda (2016) também valida os dados de acordo com níveis medidos de maré, mas em um ponto localizado mais a jusante do estuário, em um ponto de observação de Paranaguá. Neste ponto o nível medido oscila entre -1,09 m e 0,98 m no mês de fevereiro. Na simulação do presente trabalho o nível obtido para o ponto “Marégrafo – Paranaguá”, localizado próximo ao referido ponto de observação, apresenta valores entre 1,00 e 1,05, também indiciando eficiência do modelo.

4.1 PERÍODO CONSIDERADO

Ao analisar os resultados de saída da modelagem hidrodinâmica do cenário base, identificou-se valores discrepantes no início da simulação. Identificando o tempo de aquecimento do modelo.

Na análise das velocidades os dados passam a ter caráter ciclicamente estável, em todos os pontos de observação, já a partir do dia 2 de outubro. A Figura 4.2 mostra a magnitude da velocidade no ponto “porto paranagua”, com variações grandes no início da simulação.

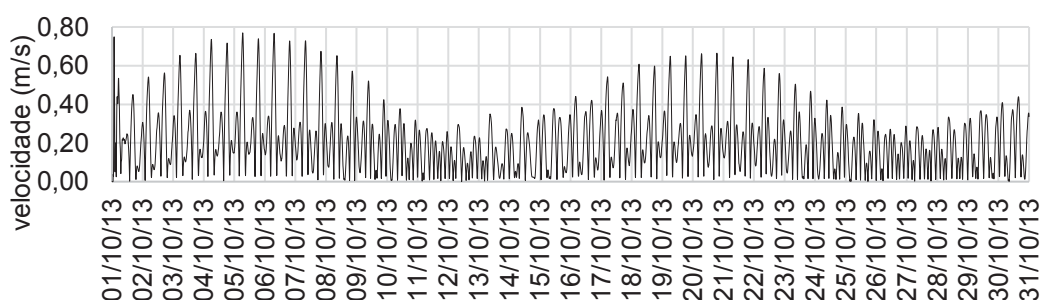


Figura 4.2 – Magnitude da velocidade no ponto de observação “porto paranagua”.

Os dados gerados de salinidade começam a apresentar estabilidade apenas a partir do dia 8 de outubro. A exemplo a Figura 4.3 expressando as salinidades de fundo e de superfície no cenário base no ponto de observação “porto paranagua”, localizado na extremidade oeste do Porto de Paranaguá.

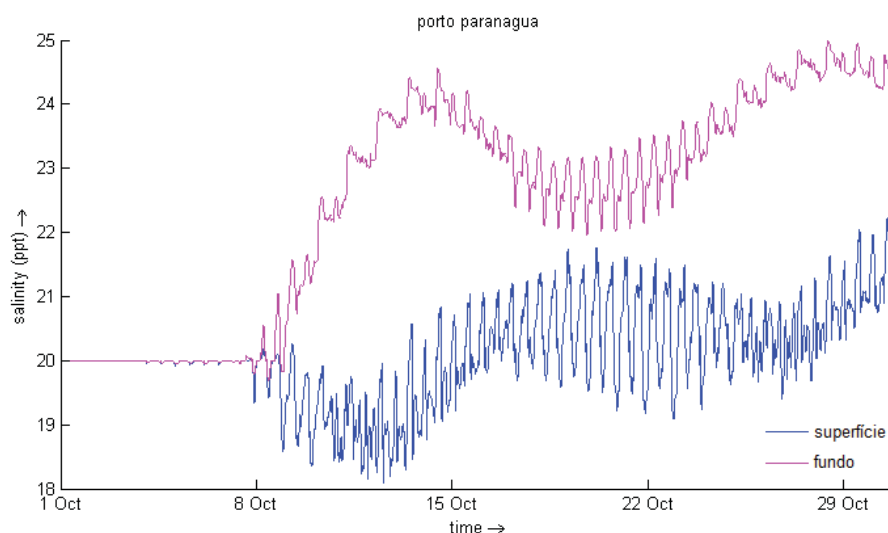


Figura 4.3 - Salinidade de superfície e de fundo no ponto de observação “porto paranagua”

Assim o período considerado para avaliações históricas nesse trabalho foi de 00:00 do dia 8 de outubro à 00:00 do dia 31 do mesmo mês. A comparação com os dados do marégrafo também foram feitas para esse período (Figura 4.4), gerando dados estatísticos também para esse período (Tabela 4.2), os quais apontam eficiência do modelo hidrodinâmico.

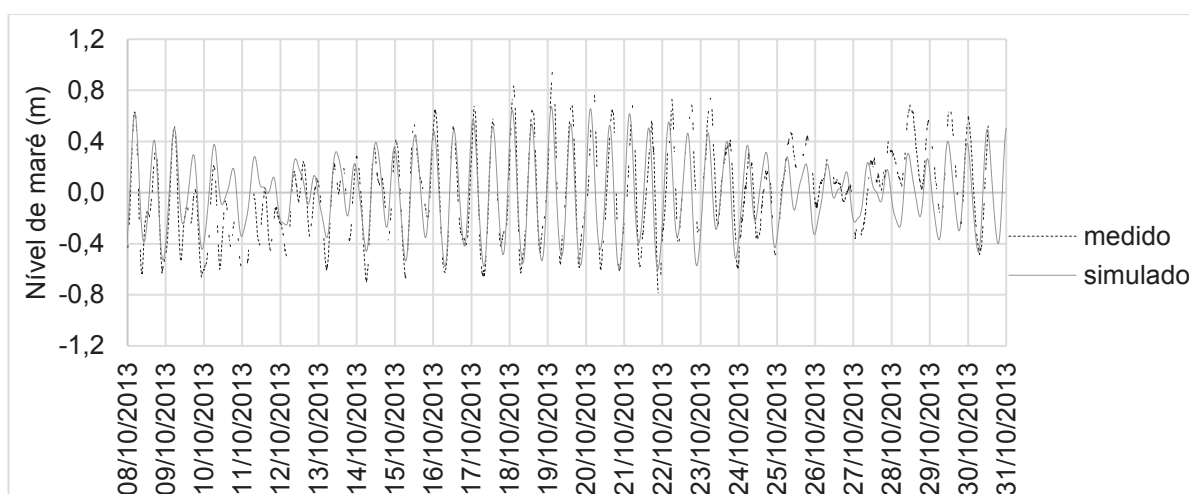


Figura 4.4 - Nível de maré observado e simulado pelo modelo adotado, na entrada do canal portuário e no período estável.

Tabela 4.2– Dados estatísticos do modelo adotado no período considerado

Erro médio	Desvio padrão	Desvio médio absoluto	Resíduo erro quadrático médio	Nash-sutcliffe
-0,0008	0,2189	0,1731	0,2188	0,6301

4.2 CENÁRIOS PROPOSTOS

O primeiro cenário é o cenário base, com os dados batimétricos já existentes. Com o modelo validado no cenário base, foi feito um segundo cenário, com alteração da batimetria no canal portuário e nas áreas de evolução dos portos de Paranaguá e Antonina, a representar o cenário dragado. A região de dragagem foi definida a partir do Programa de Dragagem de Manutenção Continuada, presente no Planejamento Estratégico da Infraestrutura Marítima dos Portos do Paraná (PEIM-PR), apresentado pela Administração dos portos de Paranaguá e Antonina (Figura 4.5), com profundidades mínimas previstas iniciando em 16 metros na entrada do canal portuário, passando a 15 m, no Porto de Paranaguá profundidade de ao menos 14 m e, por fim, 9,5 m até o Porto de Antonina.

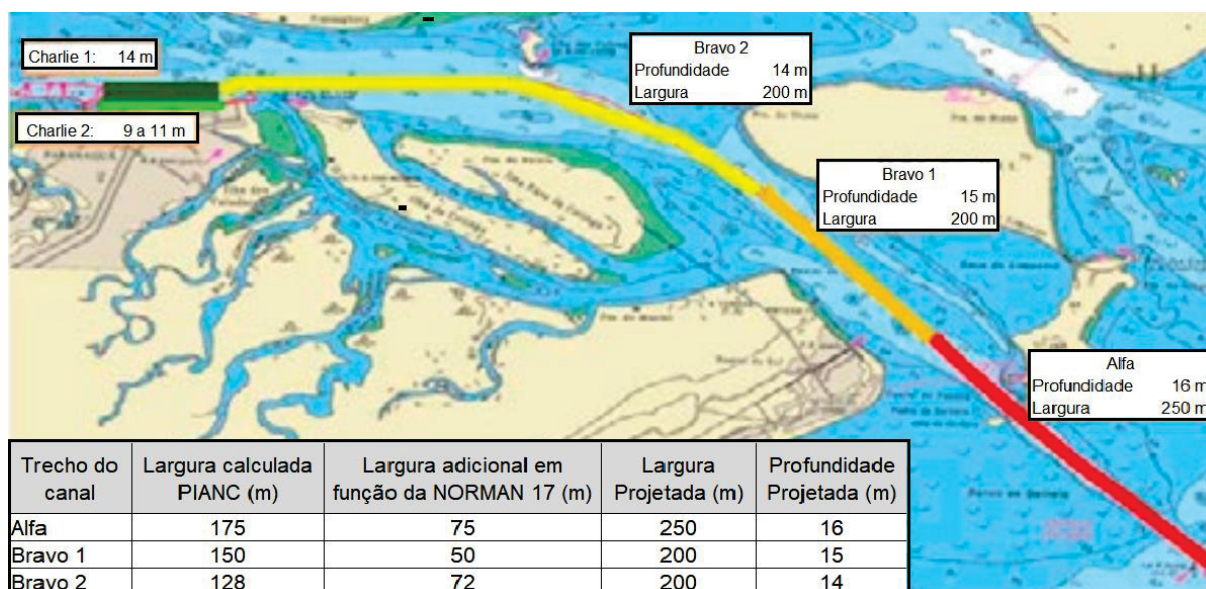


Figura 4.5 – Região de dragagem prevista no canal portuário de Paranaguá.

Fonte: APPA, 2018.

A Figura 4.6 apresenta a região da batimetria alterada, indicando as cotas mínimas exigidas, seguindo o plano dragagem.

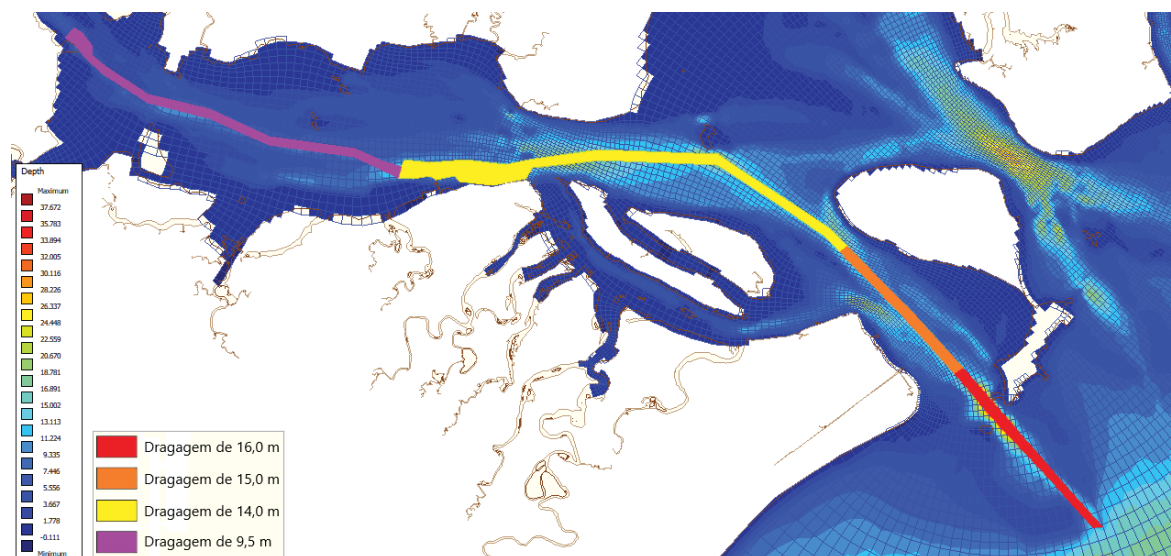


Figura 4.6 – Batimetria alterada no modelo.

A Figura 4.7 apresenta a variação do nível do leito após a batimetria alterada, no cenário dragado. As maiores alterações ocorrem na entrada do canal e entre os Portos de Paranaguá e o Porto de Antonina, tais regiões chegam a receber dragagens de mais de seis metros. Da entrada no estuário até o início da região portuária a batimetria de Paranaguá sofre menos alterações, região onde o calado natural é maior.

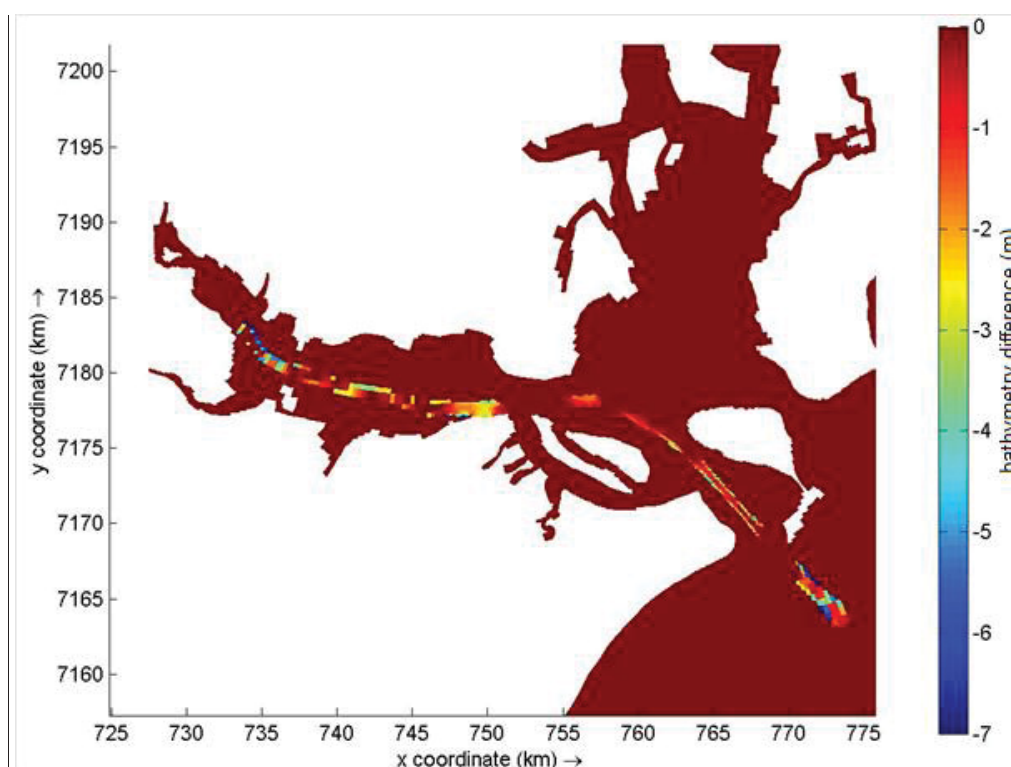


Figura 4.7 – Diferença de batimetria.

A Figura 4.8 apresenta os pontos de observação deste trabalho, assim como as seções transversais ao fluxo utilizadas para análises de vazões. A validação dos resultados foi através de dados medidos pelo marégrafo do canal da Galheta, assim adicionou-se um ponto, o “Entrance”, no mesmo local, para a comparação do nível modelado ao nível medido. Para obtenção de dados na região portuária de Paranaguá o ponto “porto paranagua” foi analisado e na região do Porto de Antonina, o ponto “porto antonina”. Ambos os pontos em destaques vermelhos na imagem ampliada.

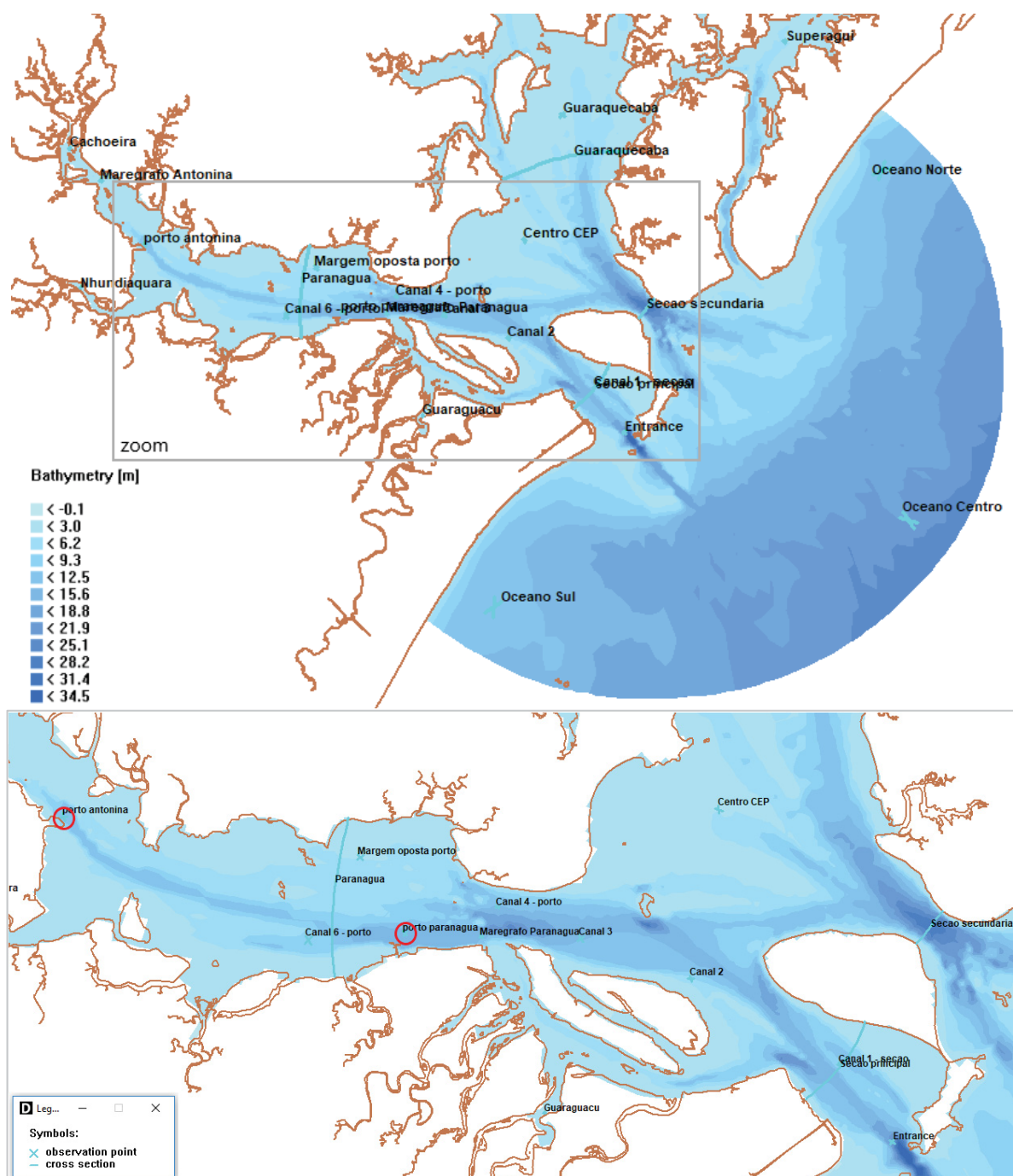


Figura 4.8 – Pontos de observação do estudo e seções transversais.

Para avaliar as variações verticais ao longo do canal com especificidade em todas as camadas, criou-se uma seção longitudinal, representada na Figura 4.9. Essa seção gerou o perfil da Figura 4.10, onde estão indicadas as batimetrias do cenário base e dragado e evidencia os trechos de dragagem canal portuário, que, nesse corte, chega a ser de cinco metros.

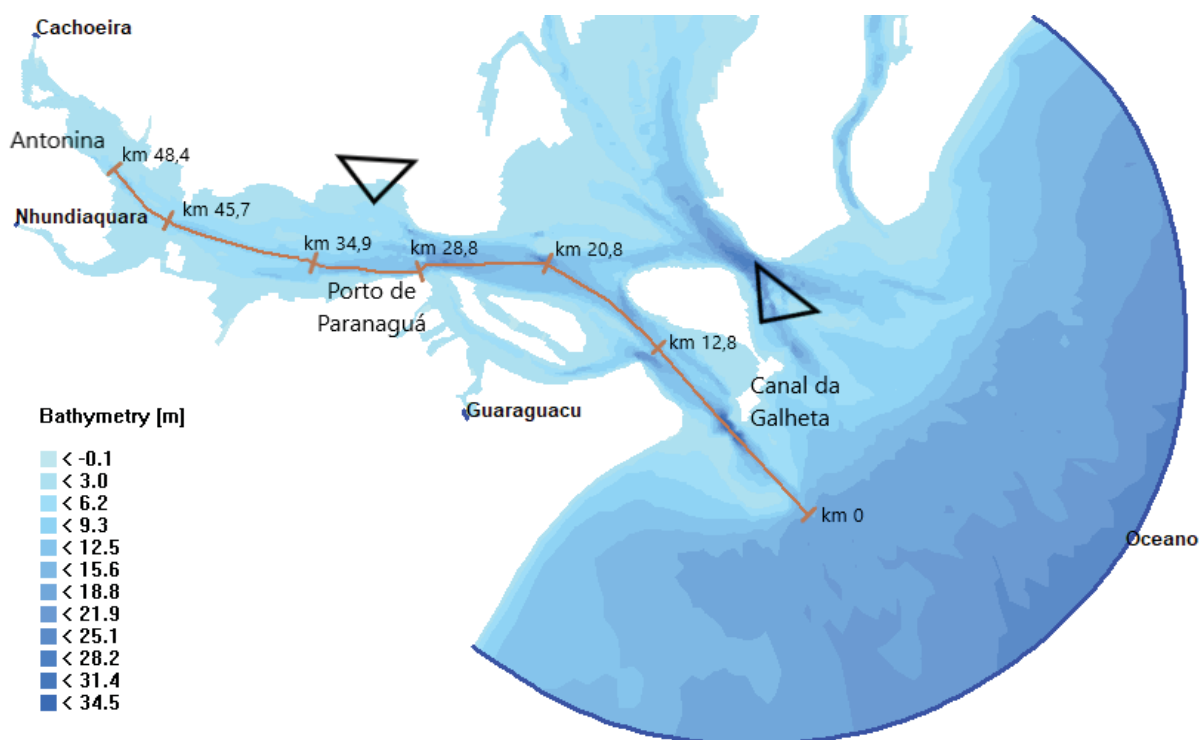


Figura 4.9 – Sessão criada no canal de navegação para observação.

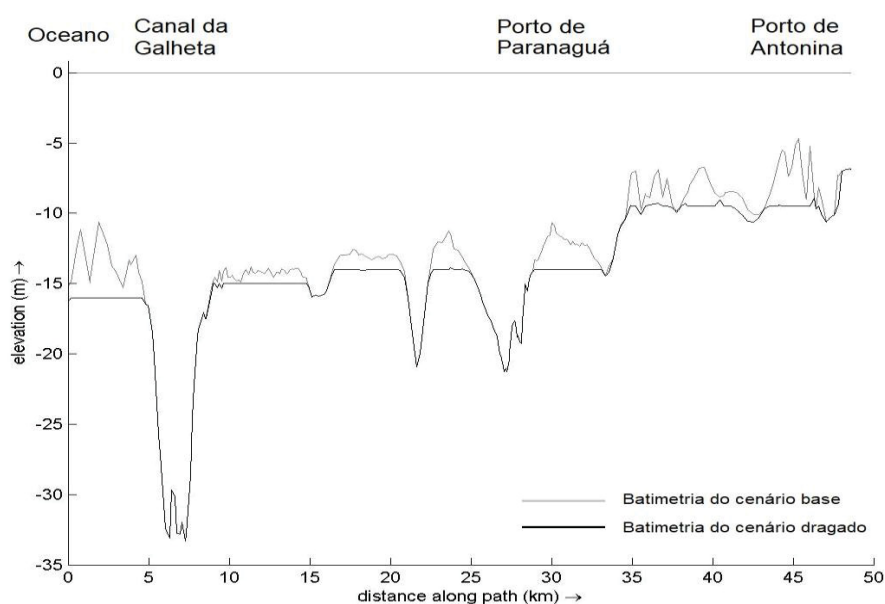


Figura 4.10 – Seção ao longo do canal de navegação e batimetrias dos dois cenários.

5 RESULTADOS

O período escolhido para a avaliação mais específica, dos resultados gerados pelo modelo, foi entre os dias 19 e 21 de outubro, contemplado na maré de Sizígia. Nessa época a oscilação da maré e as magnitudes de velocidades são mais altas. Além disso os dados maregráficos simulados ficaram bem próximos aos medidos (Figura 5.1), atendendo também a resultados estatísticos adequados, vide Tabela 5.1.

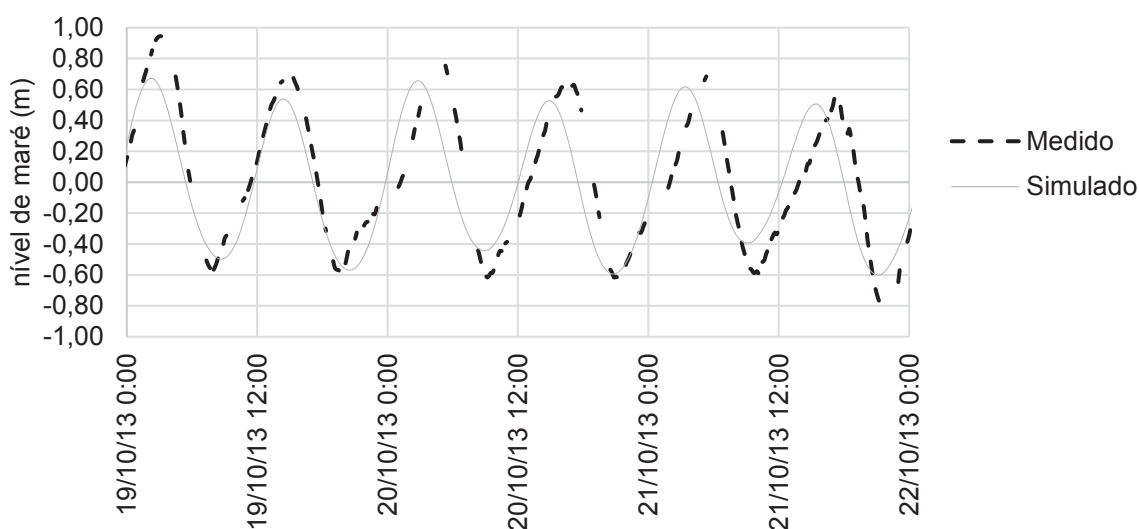


Figura 5.1 – Nível de maré (m) medido e simulado no Canal da Galheta

Tabela 5.1 – Dados estatísticos do modelo para o período de 19/10/2013 à 21/10/2013.

Erro médio	Desvio padrão	Desvio médio absoluto	Resíduo erro quadrático médio	Nash-sutcliffe
-0,0553	0,2762	0,2280	0,2813	0,6464

5.1 CENÁRIO BASE

Aqui serão apresentados os resultados de velocidade, salinidade e vazão no cenário base, a partir de dados históricos e também para os horários específicos, representando enchente, preamar e vazante do estuário.

Os horários para as análises foram escolhidos de acordo com as máximas velocidades (de enchente e vazante) e máximo nível do mar, no dia 20/10/2013:

- Enchente: 2:00;
- Preamar: 4:00;
- Vazante 18:00.

5.1.1 Velocidade

A análise da velocidade foi feita pontualmente, em gráfico espacial e no decorrer da seção longitudinal adotada.

Através de pontos de observação apresentados – no capítulo anterior, na Figura 4.8 – as velocidades médias das camadas foram estudadas em dois locais de interesse, na região do Porto de Paranaguá (no ponto “porto paranagua”) e na região do Porto de Antonina (no ponto “porto antonina”).

No ponto “porto paranagua” a maior vazão é na direção Leste-Oeste, o que também justifica a maior magnitude da velocidade em x (Figura 5.2). Neste, observa-se que as velocidades no sentido oeste-leste são mais intensas, com valores absolutos em x maiores quando o vetor é positivo do que quando é negativo. Uma vez que a velocidade média no sentido da jusante ultrapassa 0,6 m/s e, na direção a montante, não chegam a 0,4 m/s.

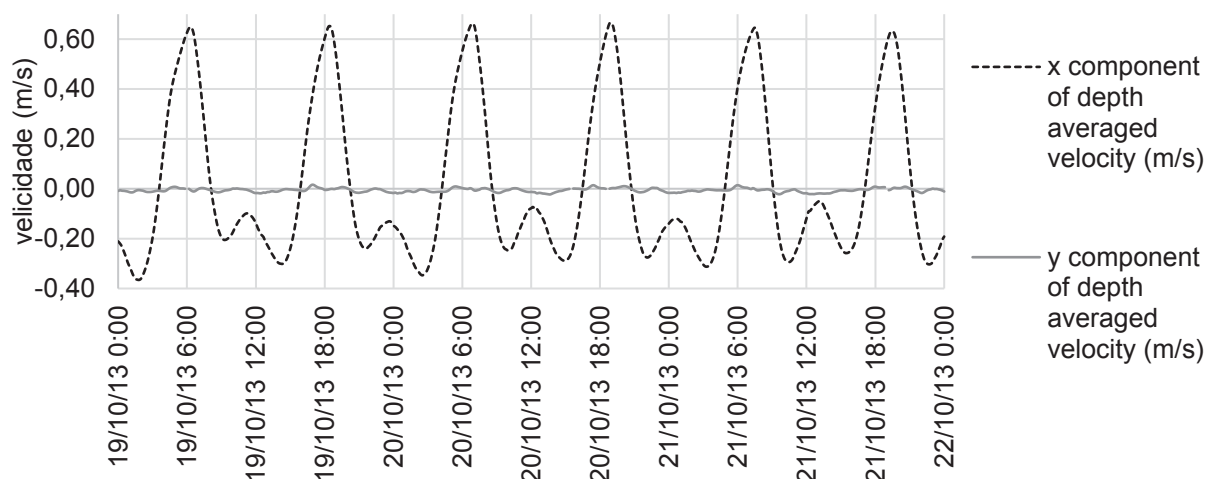


Figura 5.2 – Velocidades ao longo das camadas, nas direções x e y, no período de avaliação, no ponto de observação “porto paranagua”.

A região do Porto de Antonina apresenta menores velocidades em magnitude e, o ponto “porto antonina” (Figura 5.3) tendência para um regime de escoamento não majoritário em um só eixo do plano cartesiano. A orientação do canal estuarino nesse ponto é diagonal aos eixos cartesianos, assim as amplitudes de velocidades são semelhantes nas direções x e y, sendo pertinente apresentar a magnitude de velocidade, resultante das duas componentes (Figura 5.4).

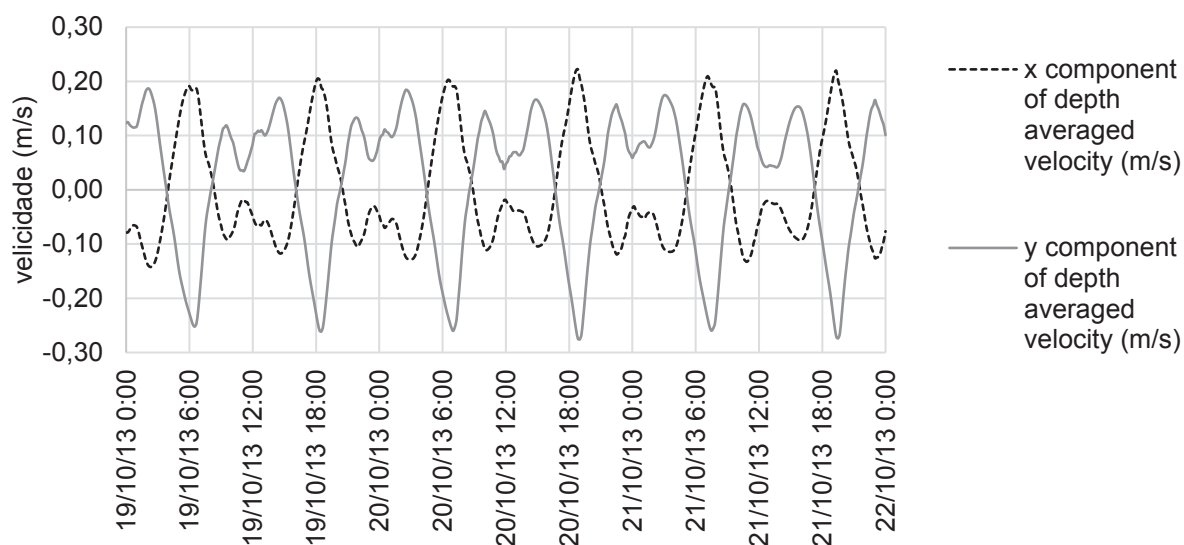


Figura 5.3 – Velocidades ao longo das camadas, nas direções x e y, no período de avaliação, no ponto de observação “porto antonina”.

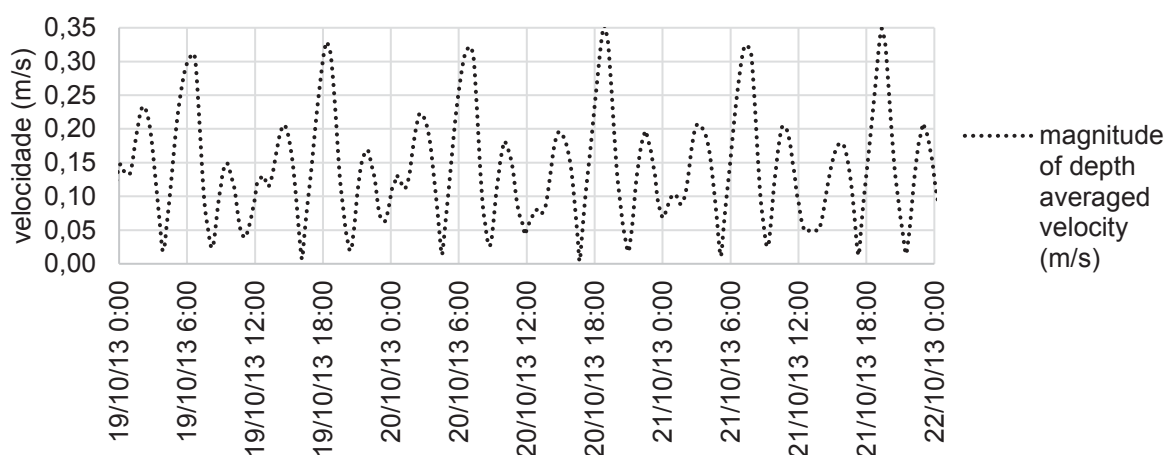


Figura 5.4 – Magnitude da velocidade média ao longo das camadas, no período de avaliação, no ponto de observação “porto antonina”.

A velocidade média na região do Porto de Antonina em regime de vazante atinge 0,35 m/s, já as de enchente ficam em torno de 0,20 m/s.

A velocidade horizontal média para um tempo específico pode ser apresentada em forma de gráfico espacial, em camadas específicas, ou como velocidade média dessas camadas. As velocidades médias ao longo da profundidade foram analisadas em gráficos espaciais nos horários de maiores velocidades de enchente e vazante (Figura 5.5 e Figura 5.7, respectivamente). Expõe-se também, na Figura 5.6 o regime de corrente na maré mais alta do dia, às 4:00.

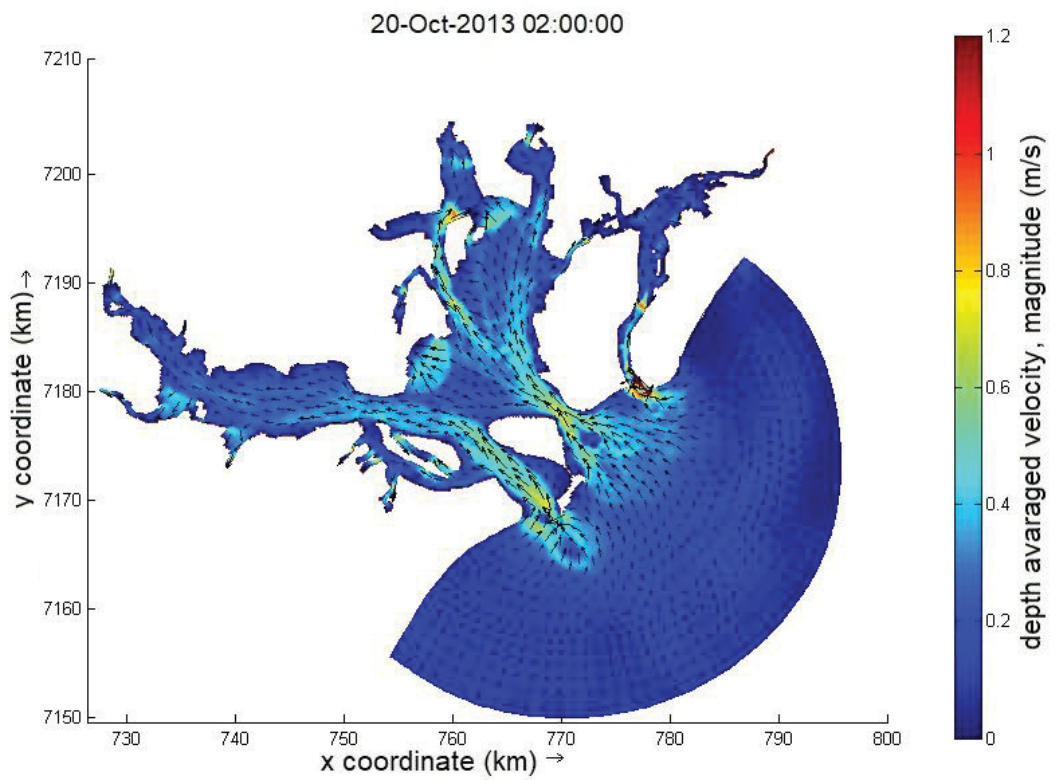


Figura 5.5 – Magnitude da velocidade média de máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

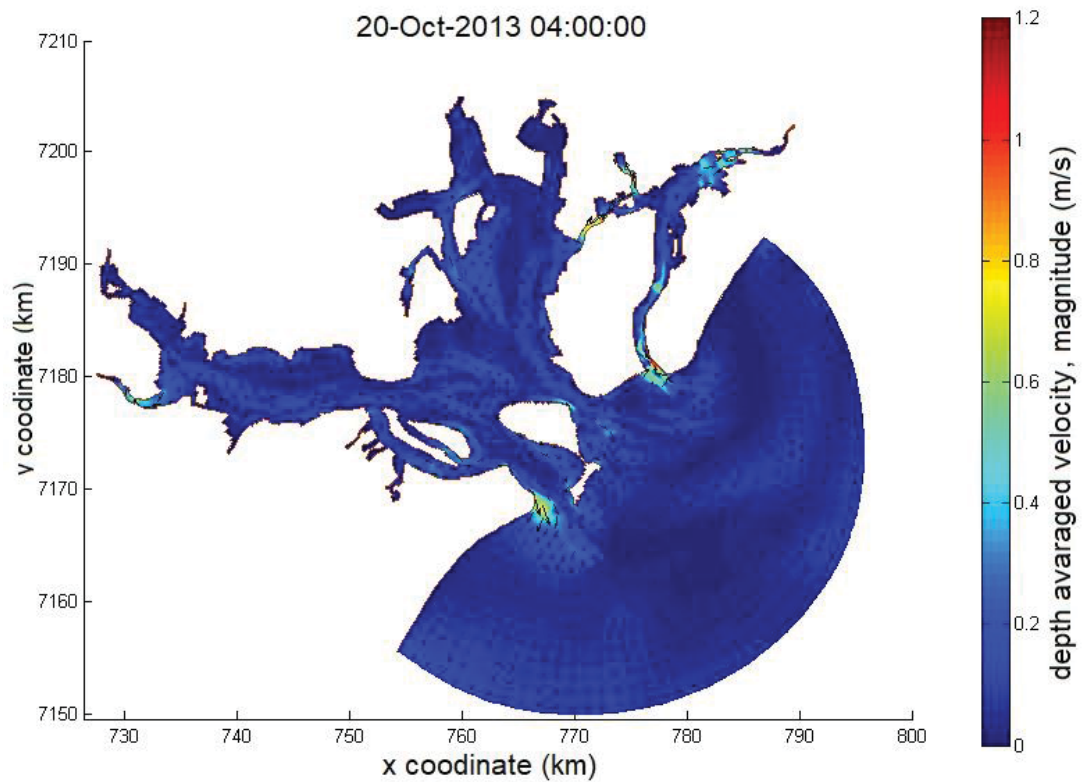


Figura 5.6 – Magnitude da velocidade média em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

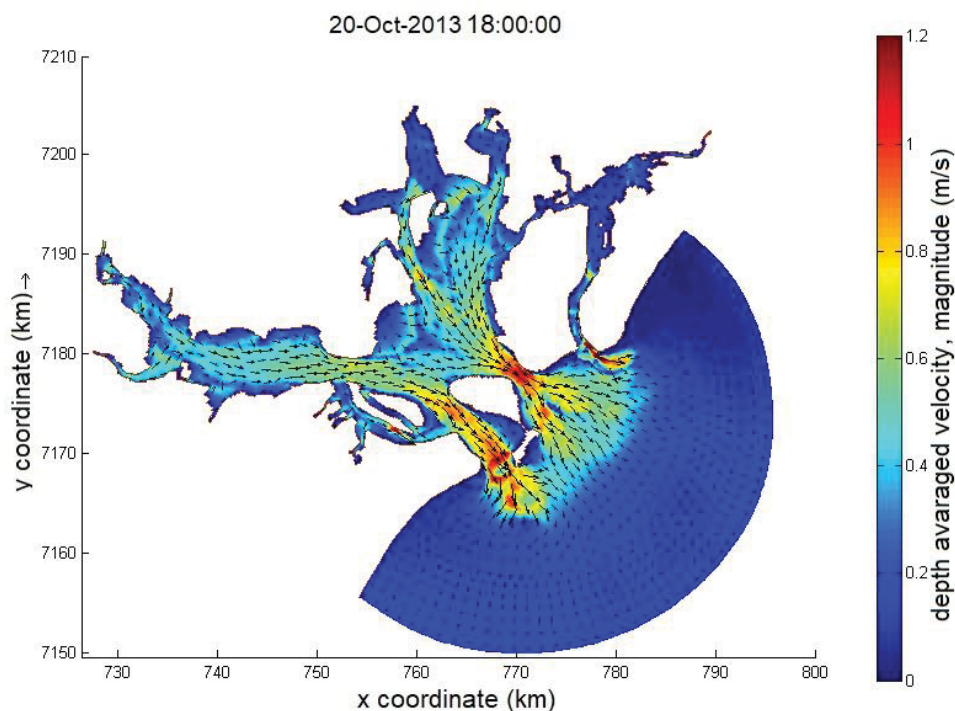


Figura 5.7 – Magnitude da velocidade média de máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

As maiores velocidades diárias são atingidas no horário de máxima vazante, por volta das 18h, e têm magnitudes na ordem de 0,6 m/s na região do Porto de Paranaguá e de 1,2 m/s no canal da Galheta. Já as velocidades na enchente do estuário não ultrapassam 0,8 m/s.

Na seção criada para avaliar os parâmetros físicos no decorrer do canal portuário, as magnitudes das velocidades podem ser analisadas em perfil desde o oceano até a região de Antonina. Vide Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10.

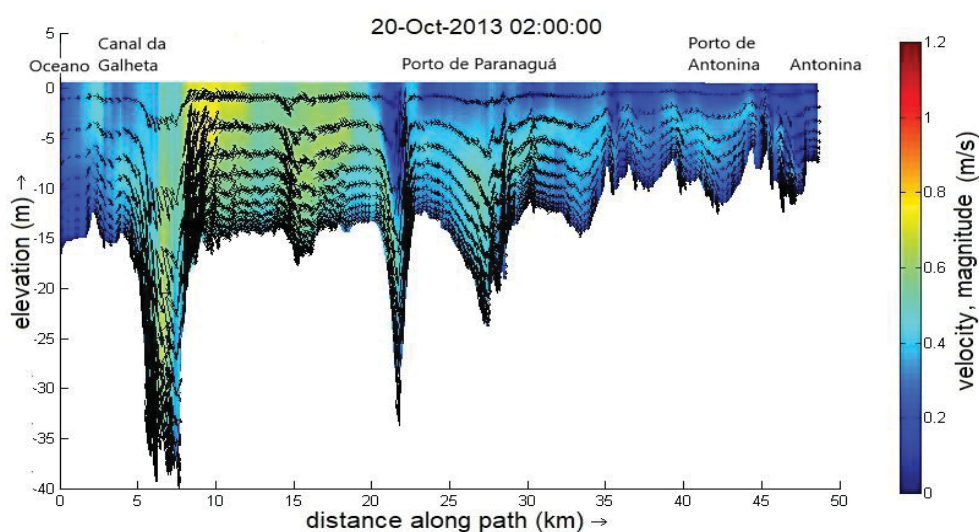


Figura 5.8 – Magnitude da velocidade horizontal de máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

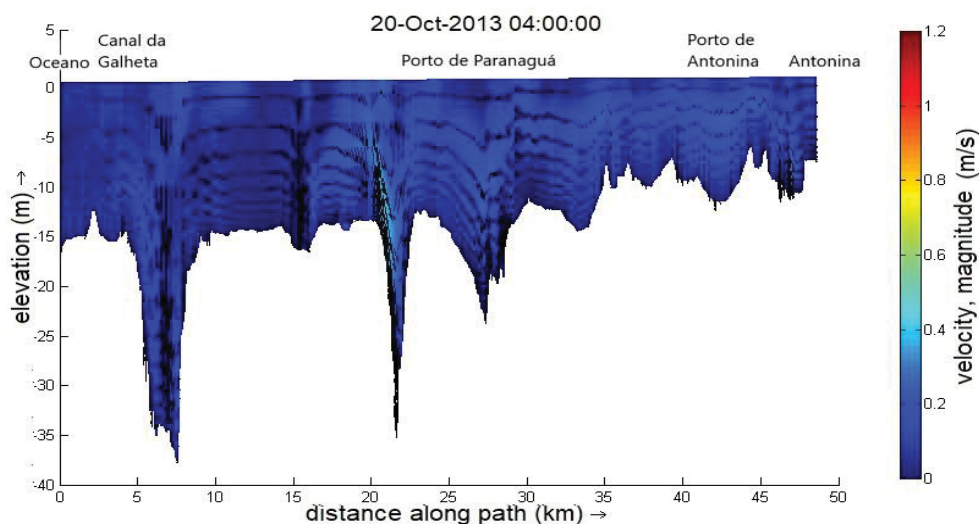


Figura 5.9 – Magnitude da velocidade horizontal em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

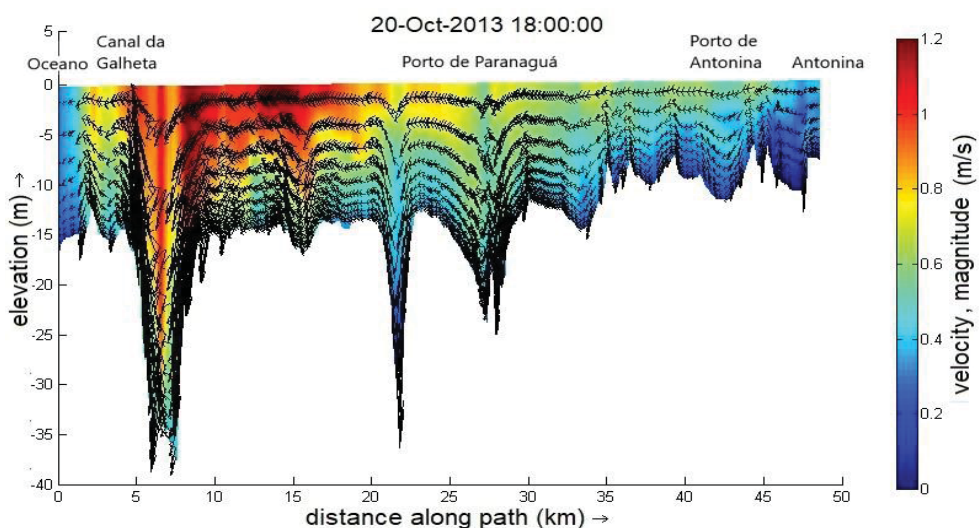


Figura 5.10 – Magnitude da velocidade horizontal de máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

As maiores velocidades, coerentemente, estão na entrada do estuário, próximo à Ilha do Mel, no primeiro estreitamento que a maré se depara. Ali também estão as maiores profundidades, sendo possível notar maiores velocidades nas camadas superiores.

No horário de preamar do estuário o perfil apresentou baixa variação de velocidade entre superfície e fundo, além de ser possível identificar maior intensidade de corrente na vertical, em especial nas regiões mais profundas, como o canal da Galheta.

A maior diferença de velocidade entre superfície e fundo ocorreu às 18h, horário em que as velocidades são mais intensas. Chegou a variar em 0,5 m/s, no

mesmo local de maior intensidade de corrente, no KM 15 da seção criada, onde a velocidade na superfície atinge 1,2 m/s.

5.1.2 Salinidade

A salinidade foi avaliada também pontualmente, com dados históricos – desde o período de pós aquecimento do modelo (08/10/2013); através de gráfico espacial; e de perfil da seção longitudinal estipulada.

Inicialmente estudou-se a salinidade em três pontos: um na entrada do canal portuário, no ponto “Entrance”; outro nas proximidades do Porto de Paranaguá; e o terceiro no Porto de Antonina. Na análise do primeiro ponto, depois do aquecimento do modelo, a salinidade se mantém constante, apontando influência exclusiva da condição de contorno do oceano. Os outros dois pontos apresentam características bastante semelhantes. Assim serão exibidos apenas os resultados simulados do ponto “porto paranagua” e do “porto antonina”.

As partículas de sal tendem a se estratificar, fazendo com que o fundo do estuário seja mais salino. Assim observa-se no ponto “porto paranagua” e no ponto “porto antonina”, que o fundo chega a ter concentração de sal até 6 psu maior do que a superfície (Figura 5.11 e Figura 5.12).

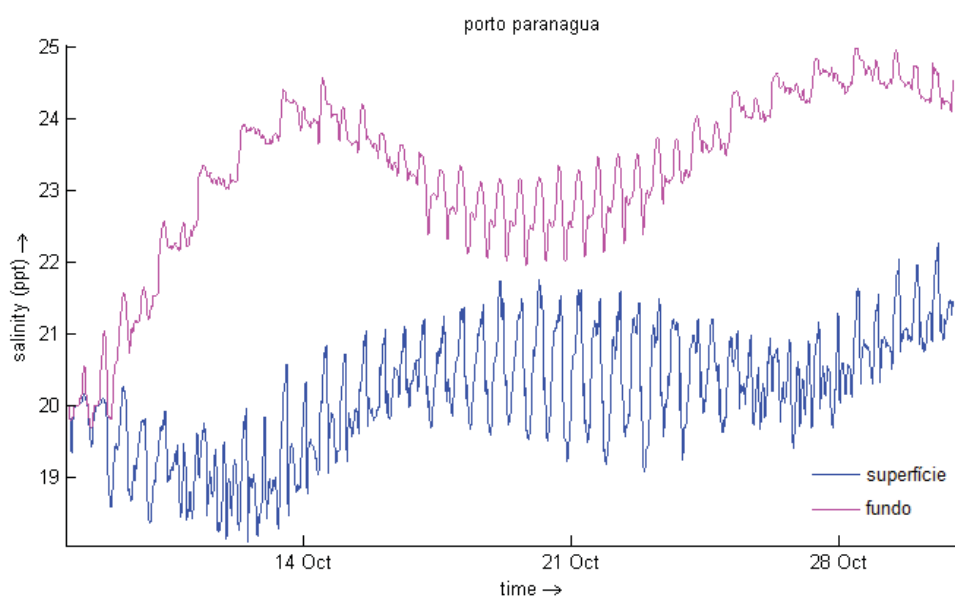


Figura 5.11 – Salinidade no ponto de observação “porto paranagua” – cenário base.

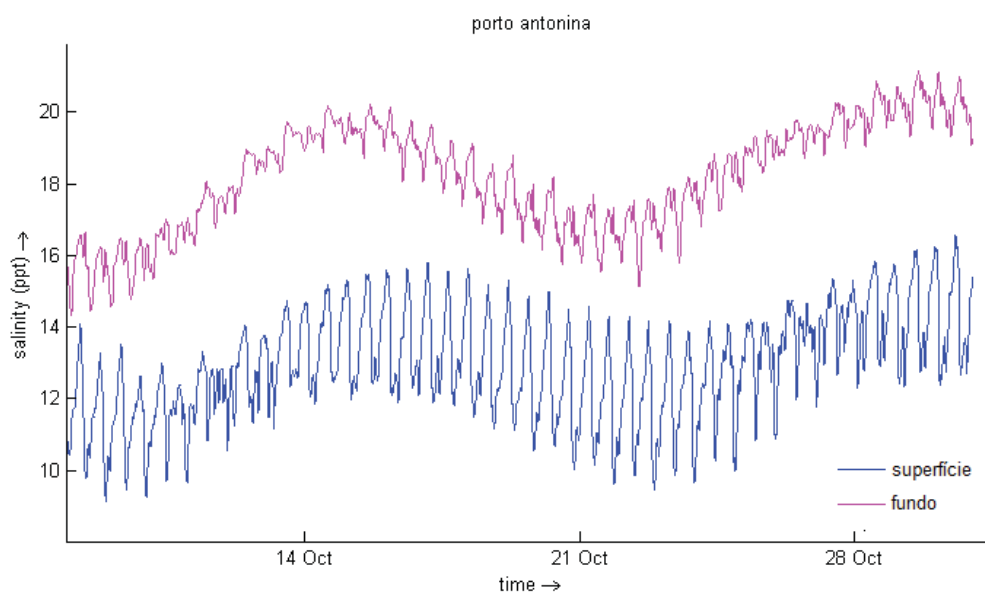


Figura 5.12 – Salinidade no ponto de observação “porto antonina” – cenário base.

Atenta-se também que na maré de Sizígia – onde há maior variação de maré no período de um dia – a diferença de salinidade não é tão discrepante como na maré de quadratura.

Comparando também as duas figuras percebe-se menor concentração de sal no ponto localizado próximo ao Porto de Antonina (Figura 5.13), uma vez que este é mais próximo aos rios.

Para uma avaliação mais completa da estratificação foram avaliadas em gráficos espaciais as salinidades na superfície e na camada mais profunda no cenário base, e ainda a diferença entre elas; nos três horários característicos.

A Figura 5.13 apresenta a salinidade na superfície, a Figura 5.14 na camada de fundo e a Figura 5.15 a diferença entre superfície e fundo, podendo apontar as regiões de estratificação mais intensas na enchente do estuário.

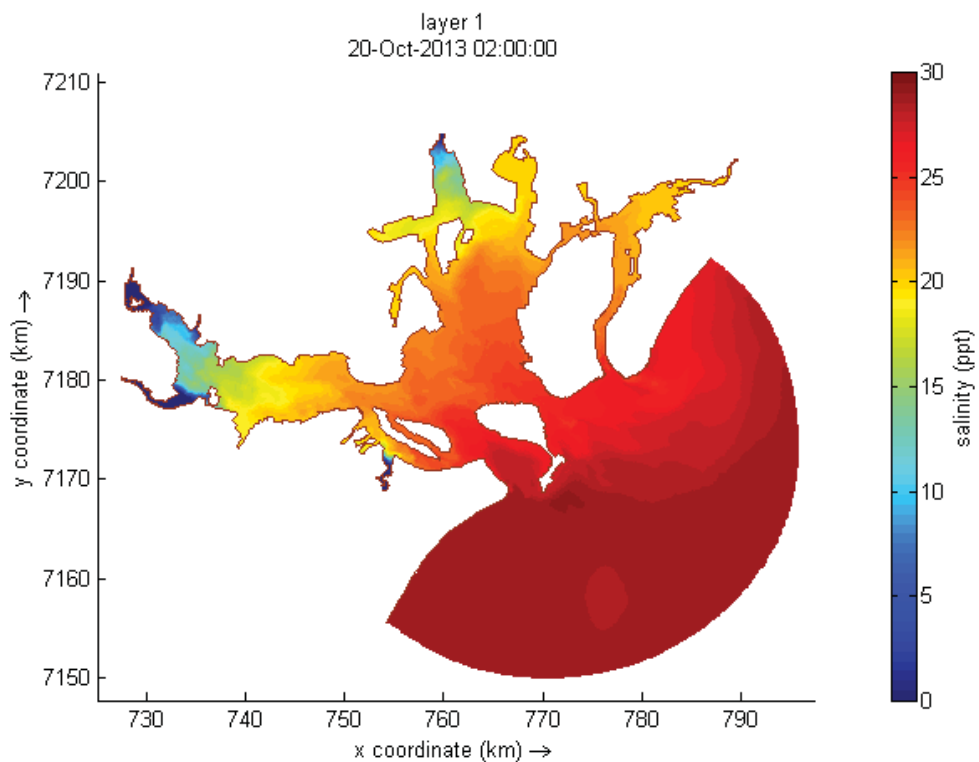


Figura 5.13 – Salinidade na superfície em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

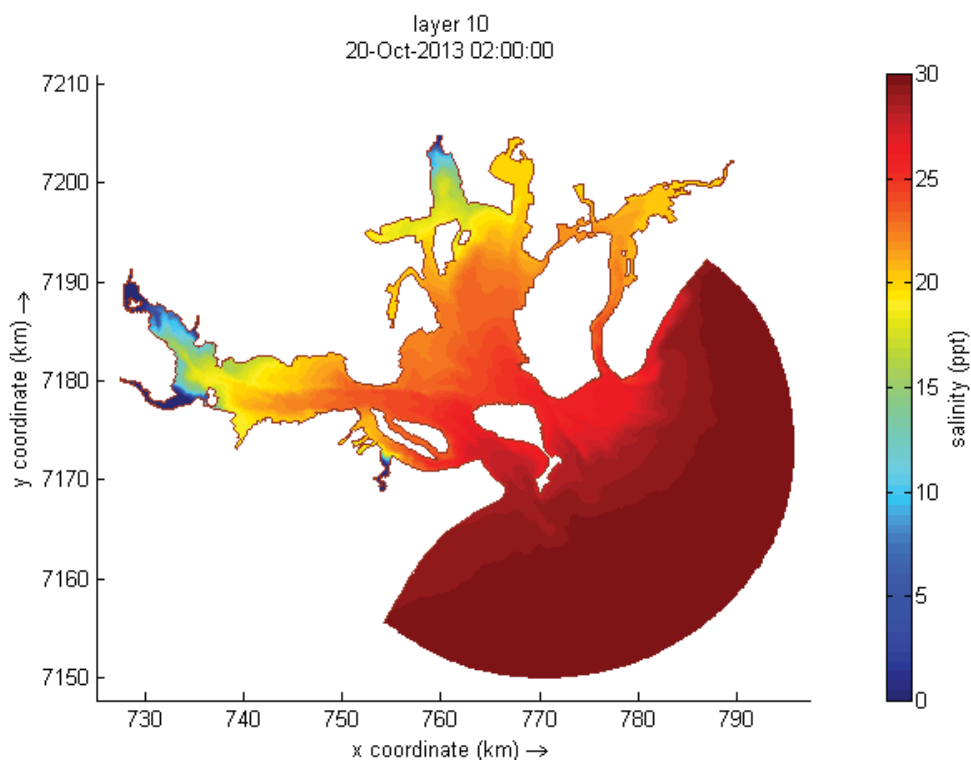


Figura 5.14 – Salinidade no fundo em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

Nas duas figuras é possível observar o domínio da água salgada na maior parte do estuário com forte controle do oceano. As descargas fluviais, com salinidade zero, têm influência concentrada nas proximidades da foz dos rios.

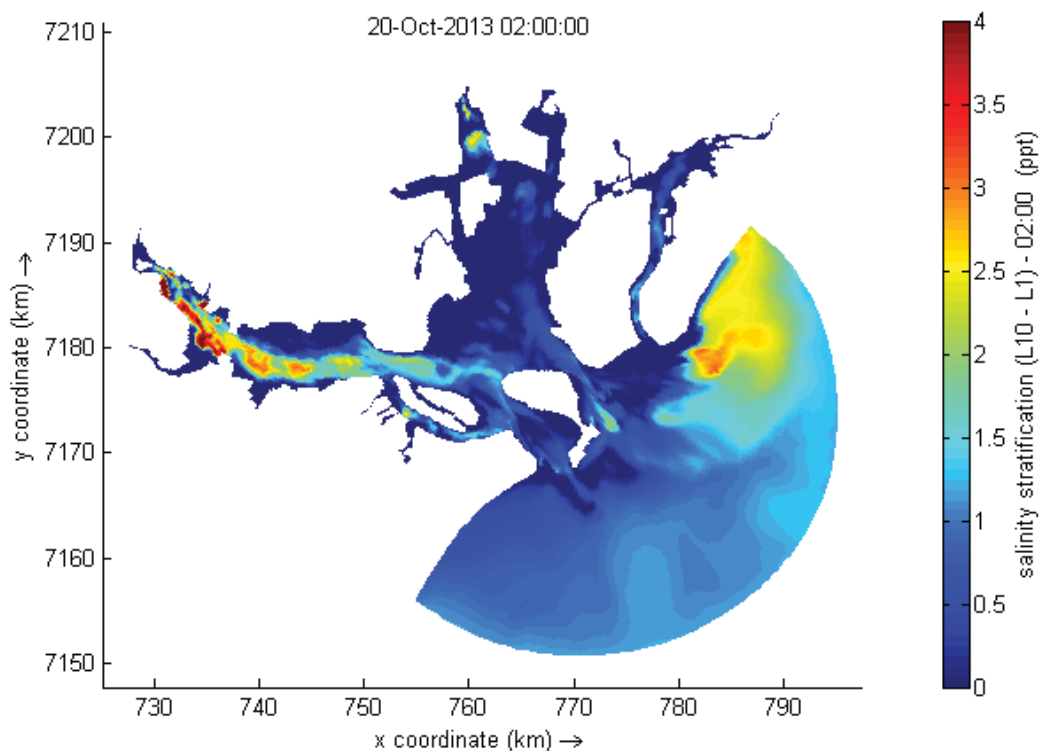


Figura 5.15 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

Com a Figura 5.15 as áreas de maiores estratificação podem ser destacadas. Na região do Porto de Antonina a diferença de salinidade entre superfície é de pelo menos 1,5 psu dentro do estuário, e próximo ao porto de Antonina chega a 4 psu de variação.

A Figura 5.16 e a Figura 5.17 apresentam a salinidade na superfície e no fundo, respectivamente, no horário de preamar do estuário. A Figura 5.18 a diferença entre elas, apontando as áreas de estratificação mais intensas para esse horário.

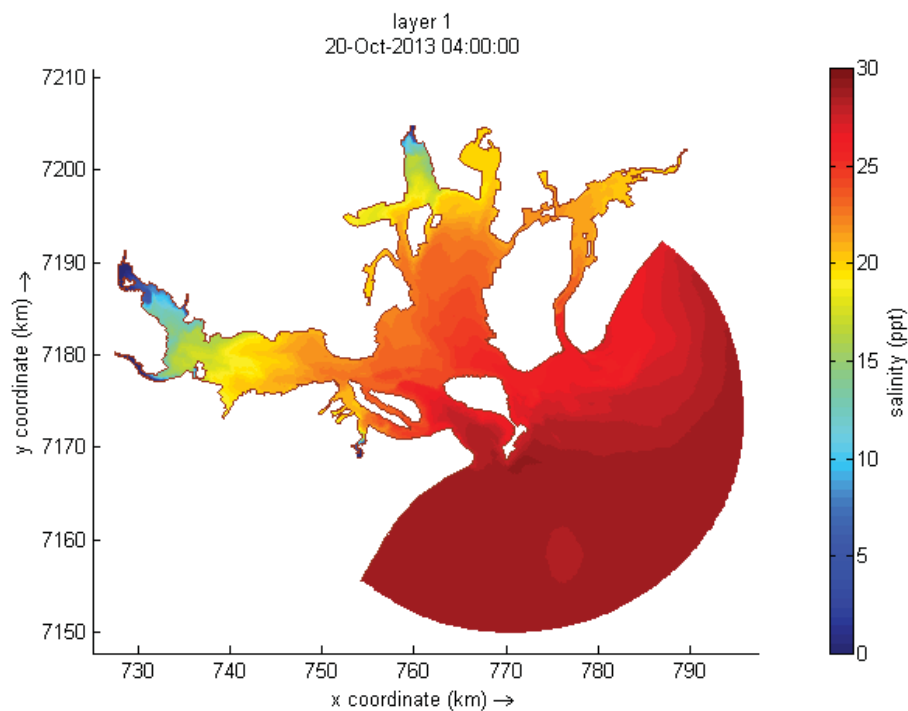


Figura 5.16 – Salinidade na superfície em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

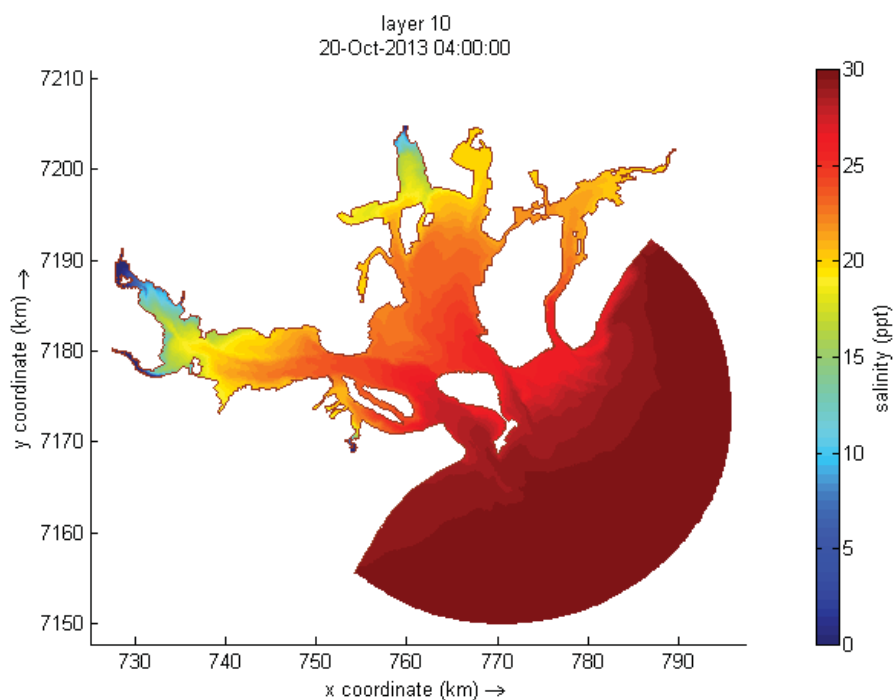


Figura 5.17 – Salinidade no fundo em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

Comparando à salinidade do estuário às 2:00, percebe-se que às 4:00 há aumento da salinidade, gerado pelo aumento da maré. O que é pertinente, uma vez que às 4:00 é o horário de máximo nível de maré, tendo maior influência da água salgada.

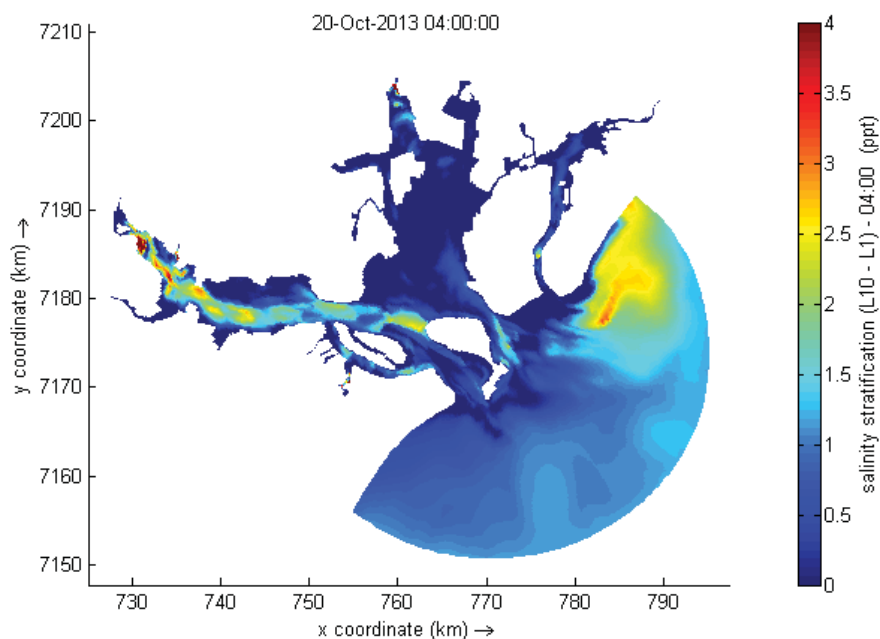


Figura 5.18 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

Quanto à estratificação também é reduzida. A região do Porto de Antonina na preamar, especialmente, apresenta variação de salinidade entre superfície e fundo em regiões mais concentradas.

Considerando o período de máxima vazante do estuário, a Figura 5.19 apresenta a salinidade na camada superficial e na Figura 5.20 a de fundo. Por fim, na Figura 5.21, a diferença de salinidade entre superfície e fundo.

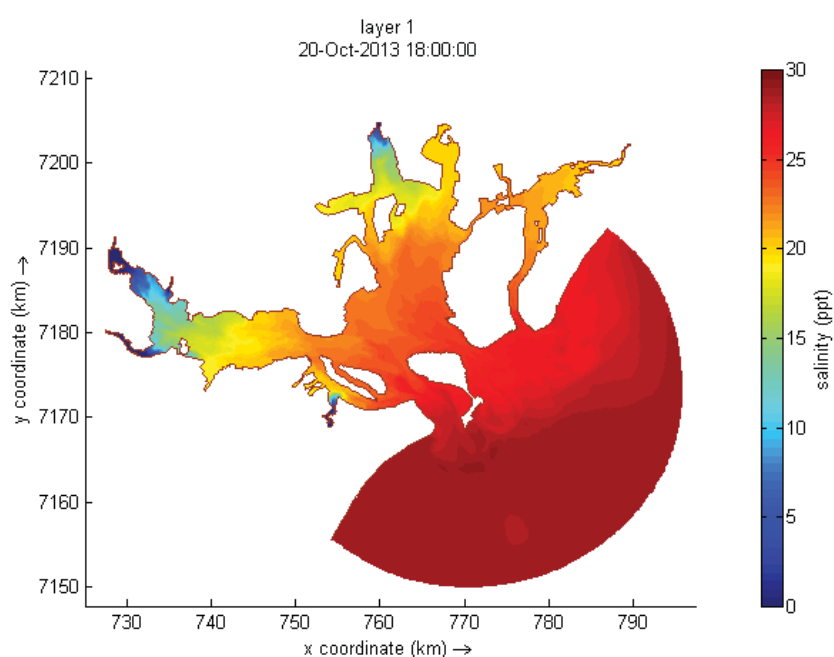


Figura 5.19 – Salinidade na superfície em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

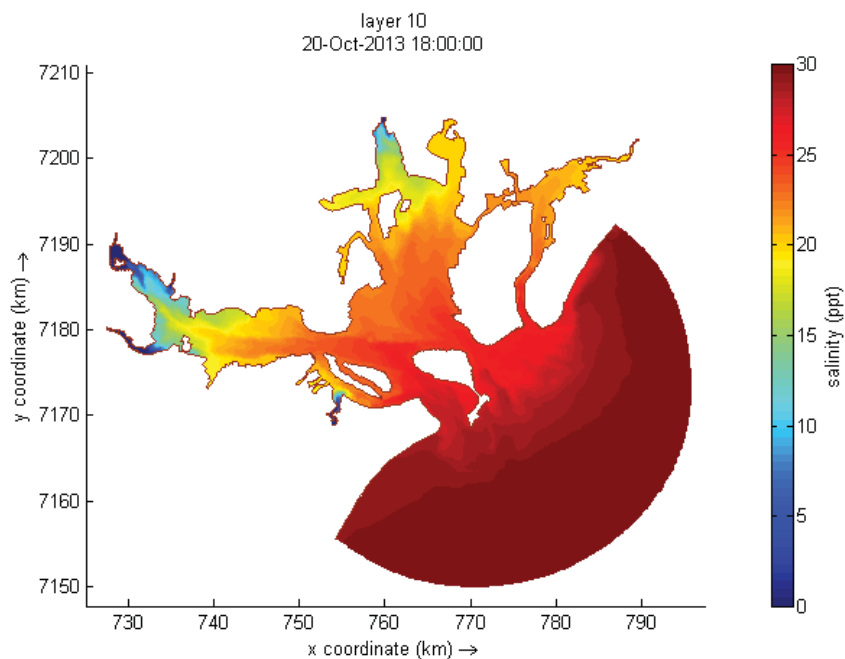


Figura 5.20 – Salinidade no fundo em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

Os gráficos espaciais de salinidade em período de vazante acusam menores concentrações de partículas de sal, bastante perceptíveis nas margens leste e oeste da Ilha do Mel; e também avanços da água com salinidade por volta de 18 psu até o porto de Paranaguá. Quanto às estratificações volta a crescer, moderadamente, na região de Antonina (Figura 5.21).

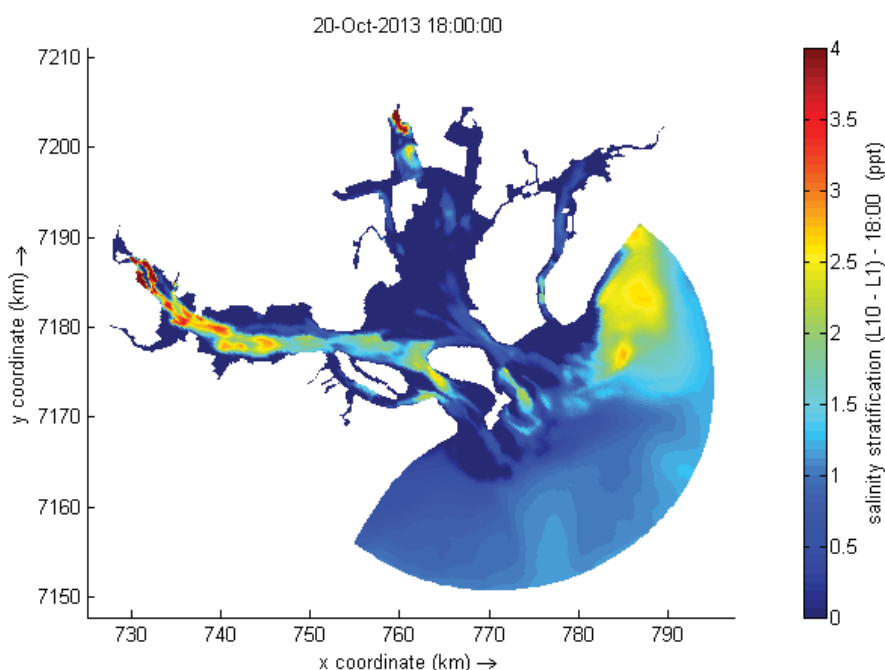


Figura 5.21 – Diferença de salinidade entre fundo e superfície em máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

As imagens em seção longitudinal representam melhor a cunha salina. Os perfis foram analisados também nos horários de 2h, 4h e 18h na Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24, respectivamente.

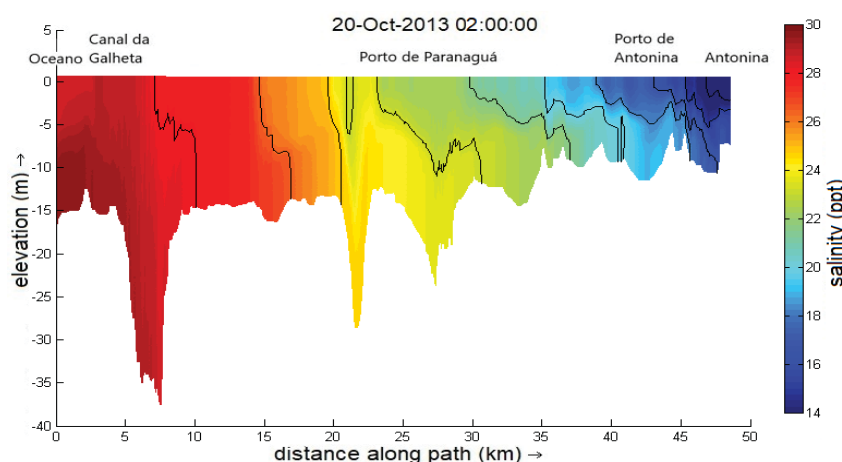


Figura 5.22 – Salinidade na máxima enchente – às 2:00 – cenário base.

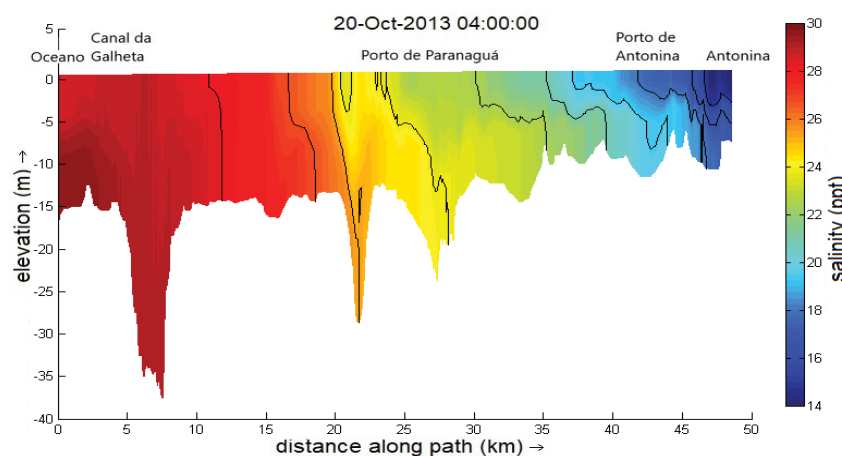


Figura 5.23 – Salinidade em horário de preamar – às 4:00 – cenário base.

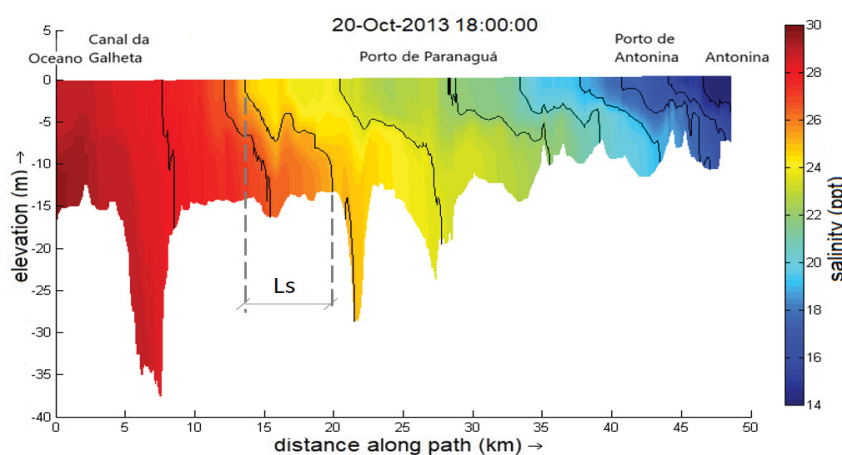


Figura 5.24 – Salinidade na máxima vazante – às 18:00 – cenário base.

Todas as figuras demonstraram presença de estratificação, apresentando nas regiões mais profundas maior salinidade do que a superfície do mesmo trecho. Tal resultado já era esperado, ao considerar os efeitos de advecção e difusão, na mistura das substâncias dissolvidas na água, inclusive as partículas de sal.

A região de Antonina tem menor concentração salina no horário de enchente. Como já observado nos resultados espaciais, em horário de vazante o trecho entre o Porto de Paranaguá e o Canal da Galheta apresenta salinidade menor do que nos demais horários.

Para comparação dos resultados do modelo e da teoria exposta na seção 2.3, o comprimento da cunha salina (L_s) no horário de máxima vazante foi valorado em 6,1 km pela modelagem (Figura 5.24). E para a avaliação teórica, na mesma região uma seção foi avaliada para valorar o comprimento da cunha salina teórico (L_i), conforme apresentado no subcapítulo 2.3.

Essa seção foi retirada do modelo deste trabalho, e estava localizada no lado oeste da ilha do Mel, no KM 15 da seção longitudinal criada, onde a profundidade no cenário base fica em torno de 12 m. A Figura 5.25 apresenta seção considerada, gerada no modelo; e a Tabela 5.2 as considerações simplificadas para o cálculo teórico, bem como o resultado L_i .

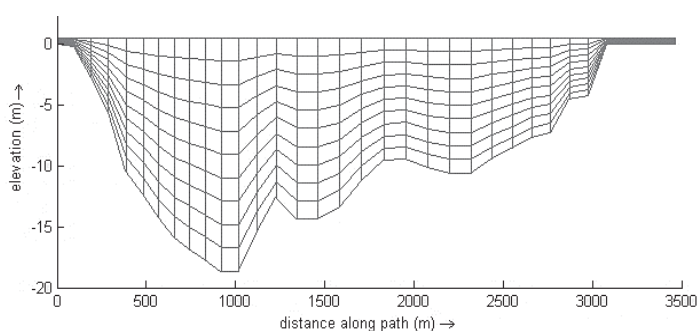


Figura 5.25 – Seção considerada no cálculo teórico do comprimento da cunha salina.

Tabela 5.2 – Considerações simplificadas para o cálculo teórico e resultado de L_i .

Velocidade (m/s)	0,7
Comprimento da seção (m)	2500
Profundidade (m)	12
ρ_1 (kg/m ³)	1000
ρ_2 (kg/m ³)	1020
$\Delta\rho$ (kg/m ³)	20
F_i	0,46074
C_i	0,005
L_i / h	0,15236
L_i (km)	1,82834

O cálculo teórico considera um sistema com profundidade e largura constantes, de duas camadas, cada uma com uma espessura, salinidade e velocidades específicas e homogênea. Mesmo com essas simplificações o valor calculado ficou na mesma ordem de grandeza que o valor simulado, o qual considera fatores mais específicos. Porém, ainda assim o comprimento da cunha salina simulado (L_s) foi mais de três vezes maior do que o calculado (L_i).

5.1.3 Vazão

Criou-se seções transversais para auxiliar na análise dos resultados. As seções “secao principal” e “secao secundaria” (apresentadas no capítulo anterior, Figura 4.8) foram posicionadas na entrada do estuário, cada uma em um lado da ilha do Mel. Assim é possível avaliar as vazões no canal principal, entre a ilha do Mel e Pontal do Sul, e entre a ilha do Mel e a ilha das Peças.

As vazões computadas no período calibrado para as duas seções estão expostas na Figura 5.26. E na Figura 5.27 o comportamento da vazão detalhada entre os dias 19 e 21 de outubro de 2013.

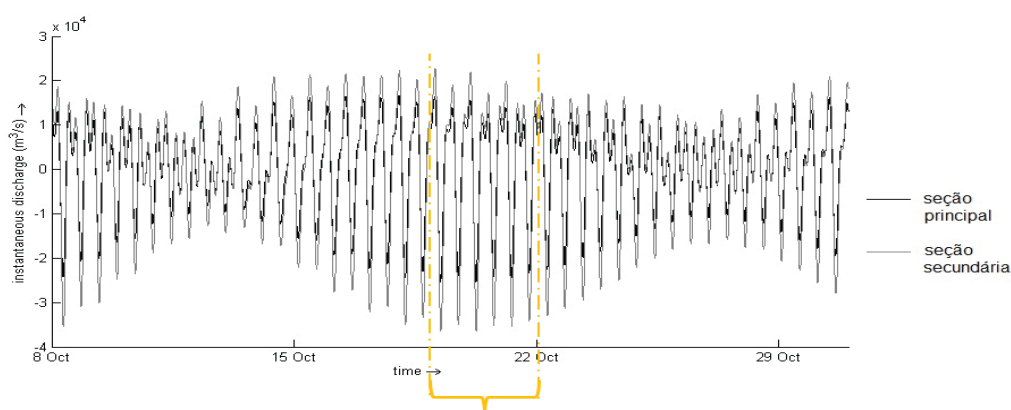


Figura 5.26 – Vazão instantânea nas seções principal e secundária, no período calibrado.

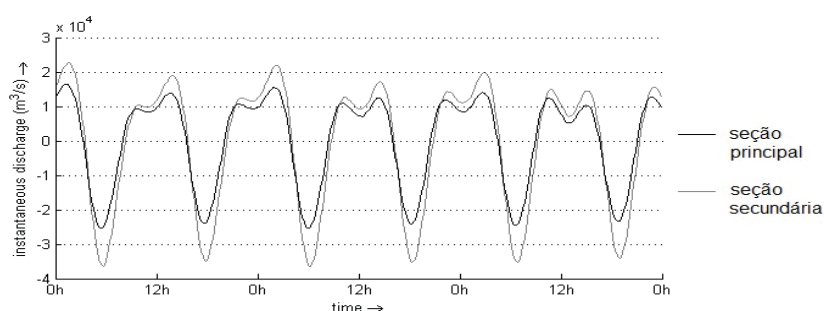


Figura 5.27 – Vazões instantâneas nas seções principal e secundária, de 19/10 à 21/10.

Na enchente, as vazões máximas na seção principal, a qual contempla o canal de acesso ao porto, ficam entre 10 e 15 mil m^3/s durante todo o período. Já na vazante, esse valor chega a 25 mil m^3/s na maré de sizígia, contudo na maré de quadratura a intensidade do fluxo de água se reduz em até 60%, e o fluxo de vazante não chega a atingir 10 mil m^3/s .

A seção secundária apresentou maiores vazões tanto na enchente quando na vazante e em ambas as marés. Os valores de enchente ultrapassaram 20 mil m^3/s em diversos dias de maré de sizígia, e os de vazante 35 mil m^3/s . O período especificado na Figura 5.27 auxilia na percepção do comportamento das vazões na sizígia.

A Figura 5.28 expõe a vazão acumulada na seção, desde o dia 1 de outubro (início da simulação), e considera como positivo o sentido oceano – estuário e negativo, o sentido estuário – oceano, representando a vazante. Percebe-se que a seção principal recebe maior fluxo de enchente e a secundária de vazante. As vazões acumuladas nas duas seções principais tendenciam para um mesmo valor absoluto, atendendo a lei da continuidade.

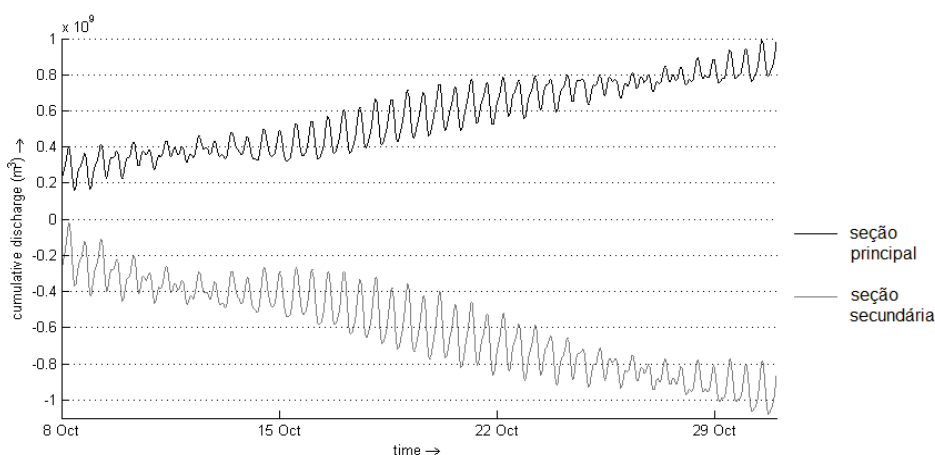


Figura 5.28 – Vazão acumulada nas seções principal e secundária, no período calibrado.

5.2 VARIAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

Assim como no cenário base, os dados de velocidade e salinidade foram quantificados no cenário dragado. Então pôde-se obter a variação entre os dois, apontando as interferências causadas por dragagens. As variações foram geradas a partir dos dados do cenário base subtraídos dos do cenário dragado. Assim, resultados positivos indicam reduções do parâmetro em questão.

5.2.1 Velocidade

Mantendo os padrões de medições, analisou-se as velocidades nos dois cenários nos pontos de observações inicialmente escolhidos: “porto paranagua” e “porto antonina”. Seguindo da avaliação das alterações em gráficos espaciais e, por fim, na seção longitudinal aplicada.

A Figura 5.29 e a Figura 5.30 representam as velocidades nos pontos “porto paranagua” e “porto antonina”, nos sentidos x e y. No mesmo período em que as velocidades no cenário base foram avaliadas, entre os dias 19/10/2013 e 21/10/2013 expõem-se os resultados dos dois cenários e as variações entre um e outro.

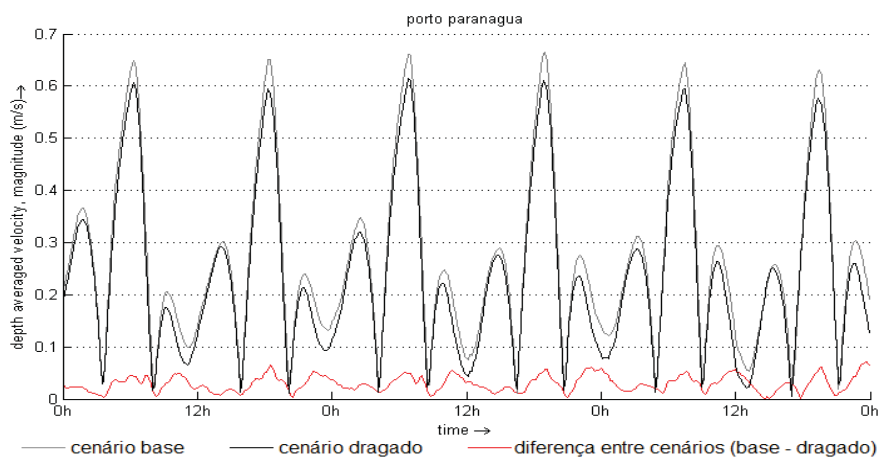


Figura 5.29 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto “porto paranagua” – período 19/10 – 21/10.

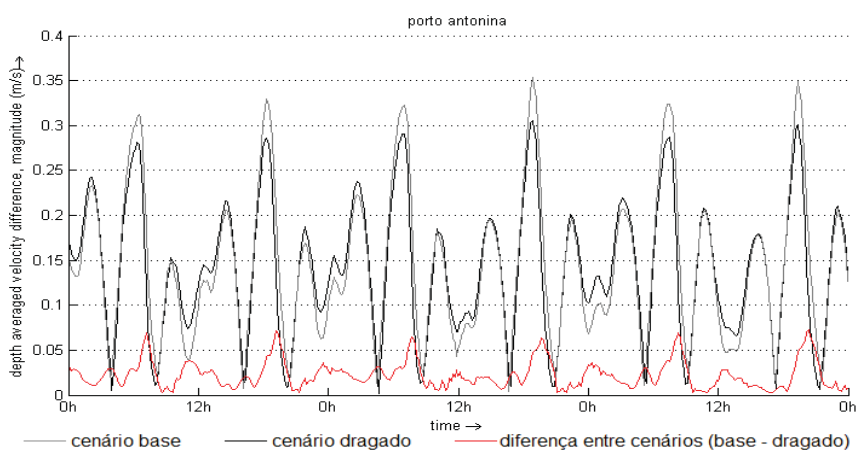


Figura 5.30 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto “porto antonina” – período 19/10 – 21/10.

Ambos os cenários possuem comportamentos de correntes bastante parecidos quanto ao regime. Contudo as amplitudes dessas velocidades são menores no cenário dragado. No arredor do porto de Paranaguá as variações ficaram em torno de 0,05 m/s, o que representa 10% de redução na velocidade. A região de Antonina também apresentou decréscimo da velocidade, porém mais representativo em percentual, onde as variações atingem 20% de significância da magnitude de velocidade do cenário base.

As diferenças das médias de velocidades ao longo das camadas estão expostas em gráficos espaciais nas figuras a seguir, representando toda a extensão da grade do estudo. Manteve-se o padrão de avaliação no dia 20/10/2013 nos horários de enchente, de cota máxima e de vazante do estuário, conforme a Figura 5.31, a Figura 5.32 e a Figura 5.33, respectivamente.

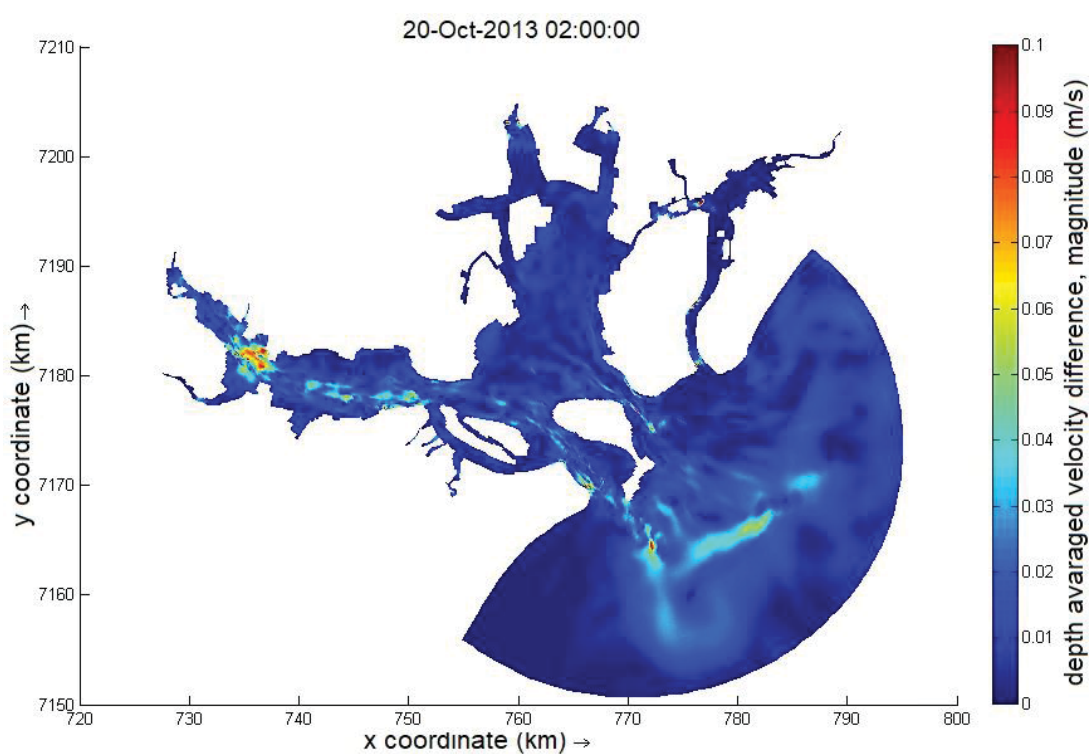


Figura 5.31 – Diferença na magnitude da velocidade média às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

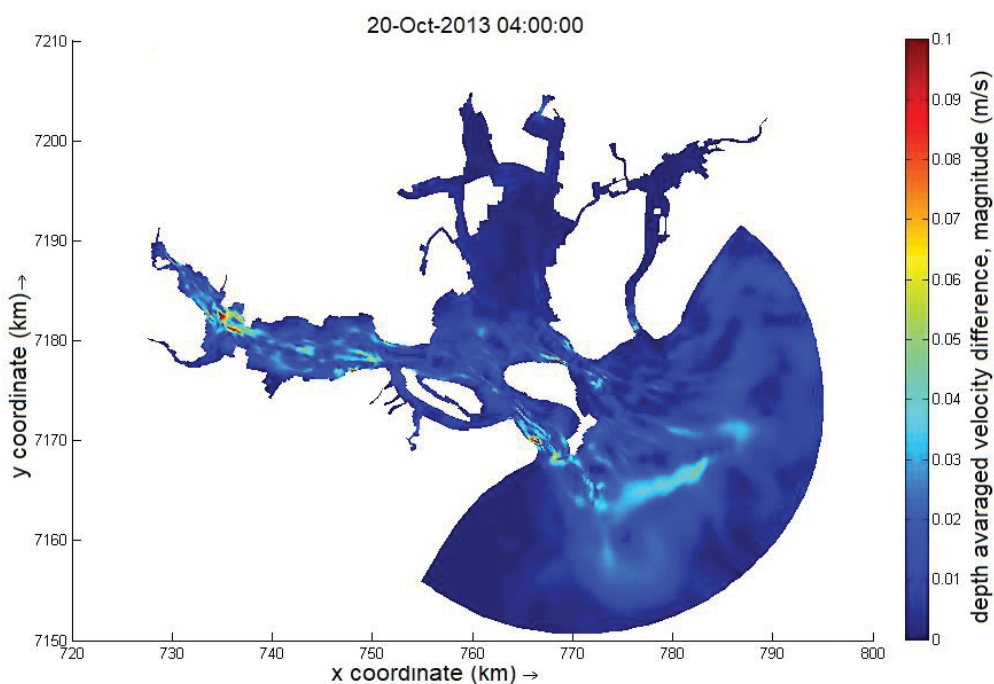


Figura 5.32 – Diferença na magnitude da velocidade média às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

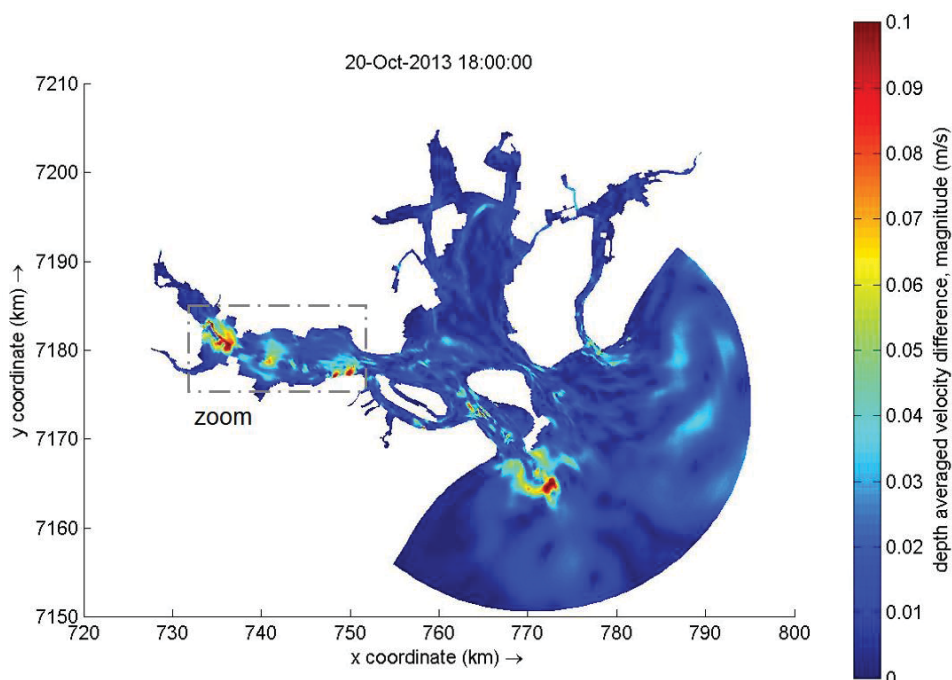


Figura 5.33 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

Pequenas alterações de velocidades são diagnosticadas no estuário, sendo maiores no canal portuário, próximo ao do Porto de Paranaguá e, principalmente, na bacia de evolução Porto de Antonina. Dentre os horários observados o que apresentou maior variação foi o de vazante, às 18:00, com reduções das médias de

velocidades de até 0,1 m/s (destacado no gráfico anterior). A Figura 5.34 apresenta essa mudança em vetores, os quais indicam desaceleração do fluxo de vazante.

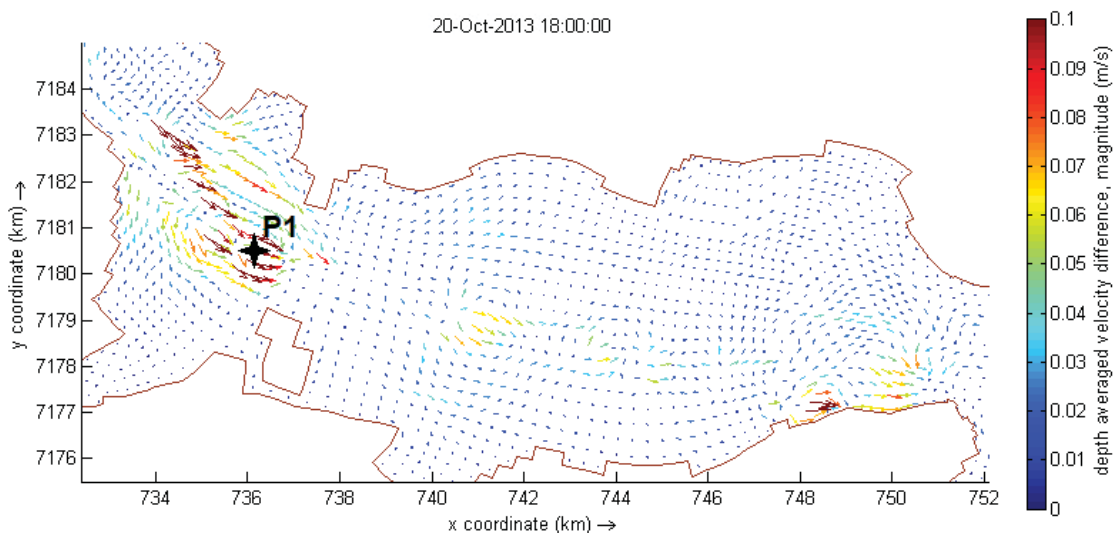


Figura 5.34 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado), na região portuária.

O perfil de velocidade do ponto P1, que está em uma das regiões de maior variação de velocidade está apresentado na Figura 5.35. Analisando o ponto em toda a profundidade, percebe-se melhor a redução da velocidade no cenário dragado e a variação chegando a 0,15 m/s, na superfície.

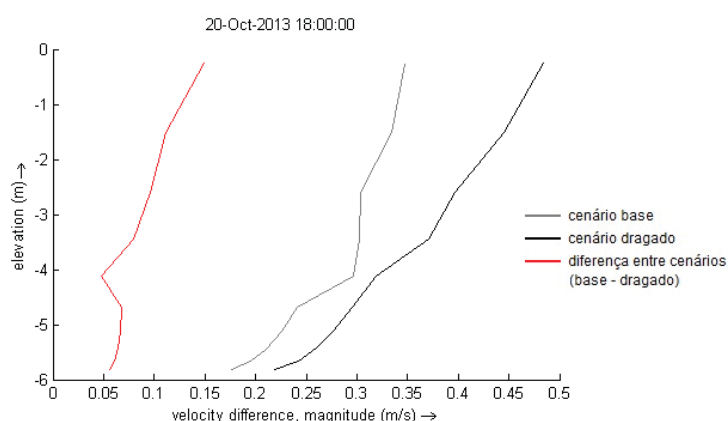


Figura 5.35 – magnitude de velocidade no ponto “porto paranagua” nos dois cenários e diferença entre elas.

No que tange o perfil da seção adotada, os impactos da dragagem nas velocidades estão representados nos três tempos escolhidos (2:00, 4:00 e 18:00 do dia 20/10/2013), conforme a Figura 5.36, Figura 5.37 e Figura 5.38.

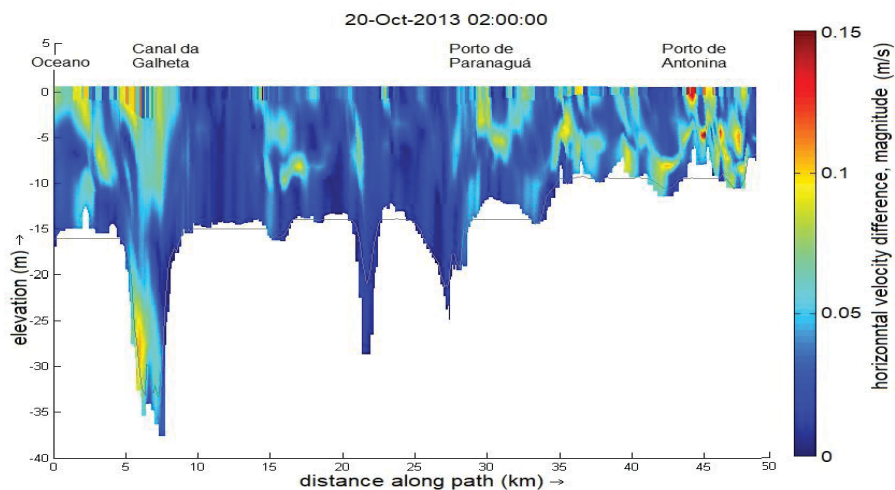


Figura 5.36 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

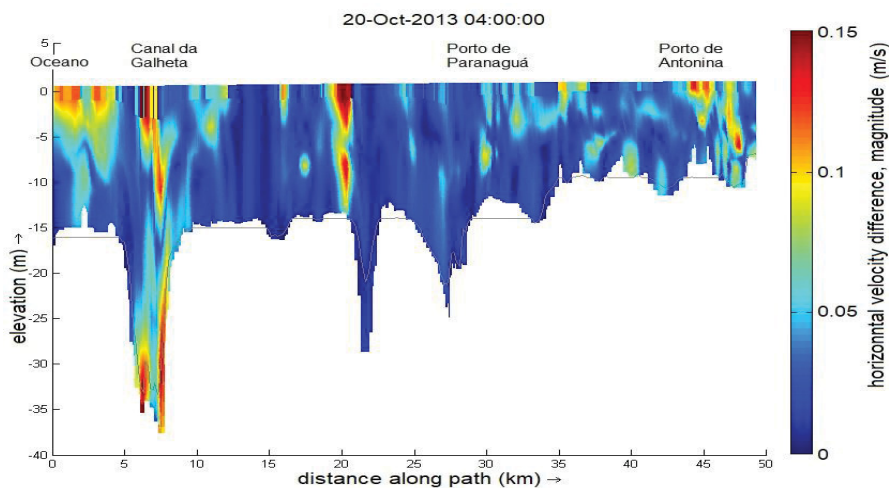


Figura 5.37 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

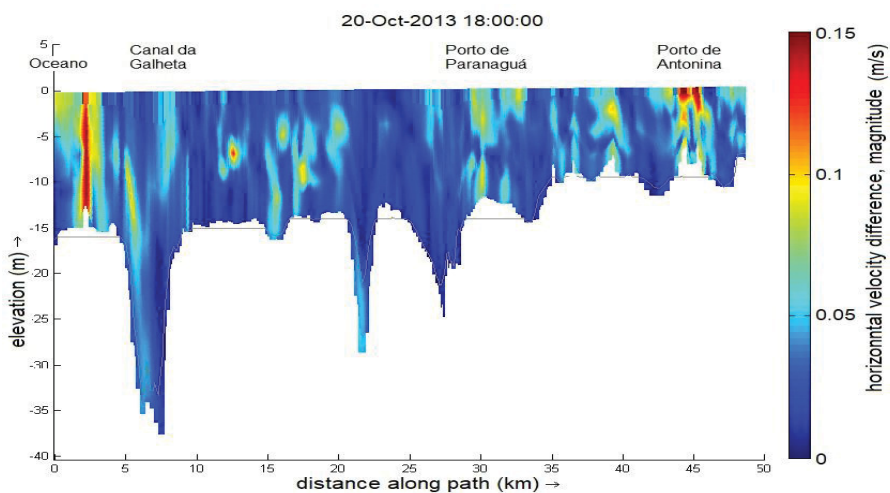


Figura 5.38 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

A representação gráfica do perfil longitudinal aponta interferências em diversos pontos do estuário nos três horários avaliados. Todas elas apresentaram redução de velocidade distribuída ao longo do canal e, com valores máximos de 0,15 m/s de variação.

5.2.2 Salinidade

A seguir as alterações de salinidade, após a dragagem ser simulada, são apresentadas de forma pontual, em gráficos espaciais e na seção longitudinal.

A Figura 5.39 apresenta a variação entre o cenário base e o dragado, avaliando no ponto “porto paranagua” a alteração na salinidade na superfície e no fundo, em todo o período válido simulado.

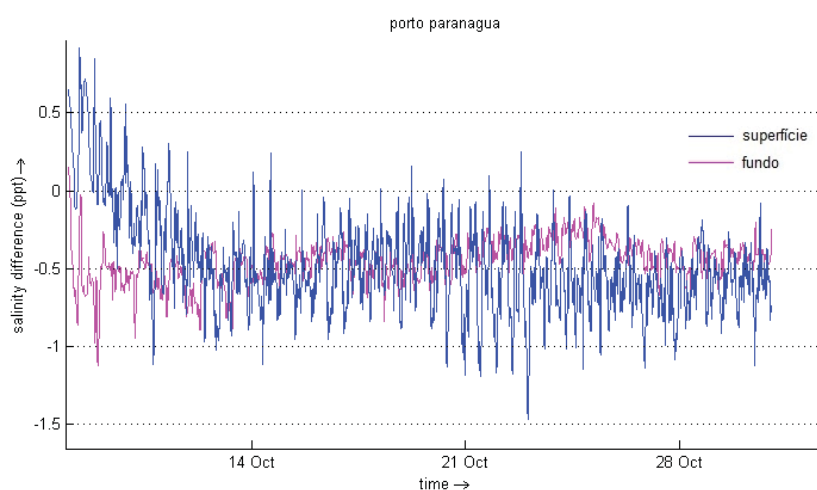


Figura 5.39 – Diferença de salinidade no ponto de observação “porto paranagua” (cenário base – cenário dragado).

Em geral a salinidade na superfície é aumentada, com alterações em torno de 0,50 psu, que podem ultrapassar 1 psu. A salinidade na superfície aumenta mais do que na camada mais profunda, onde a variação fica entre 0,25 e 0,50 psu.

É válido observar também que o início do gráfico aponta redução da salinidade na superfície; mas há de ser cauteloso com essa avaliação, uma vez que não segue um padrão conforme a sequência do gráfico e trata-se de valores do início da simulação; o que pode ser sinal de que o modelo ainda não estava suficientemente aquecido nesse período.

Uma vez que tanto superfície, quanto fundo sofreram aumento de salinidade, a variação da estratificação; calculada aqui como salinidade no fundo – salinidade na superfície) variou singelamente. A Figura 5.40 expressa as estratificações dos dois cenários e a diferença entre eles.

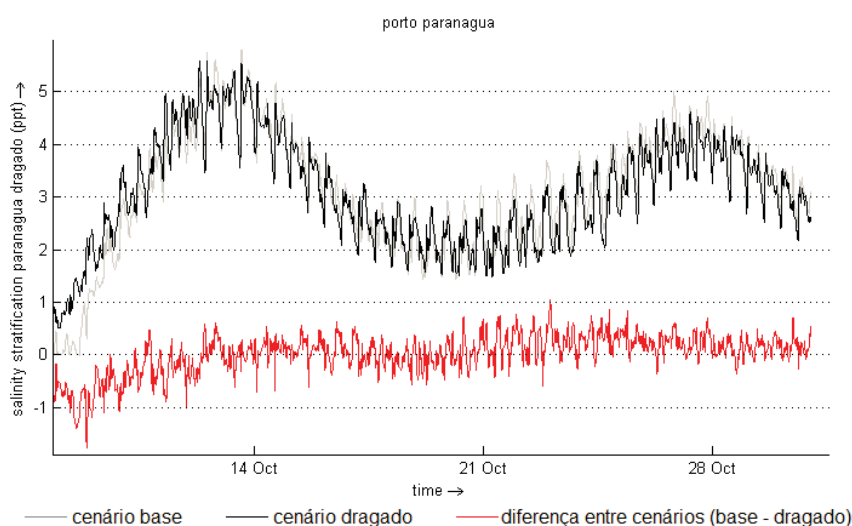


Figura 5.40 – Estratificação no ponto de observação “porto paranagua”, nos cenários base e dragado e respectiva diferença entre eles.

A estratificação na maré de sizígia é menor em ambos os cenários, os quais têm comportamentos semelhantes neste fenômeno. A diferença de estratificação salina entre eles oscila em torno de zero e em alguns picos ultrapassa + 0,5 psu, indicando redução da estratificação salina, em menos de 10%, após a dragagem.

Agora, pouco mais a montante do estuário, apresenta-se as avaliações no ponto “porto antonina” quanto às estratificações nos dois cenários (Figura 5.41)

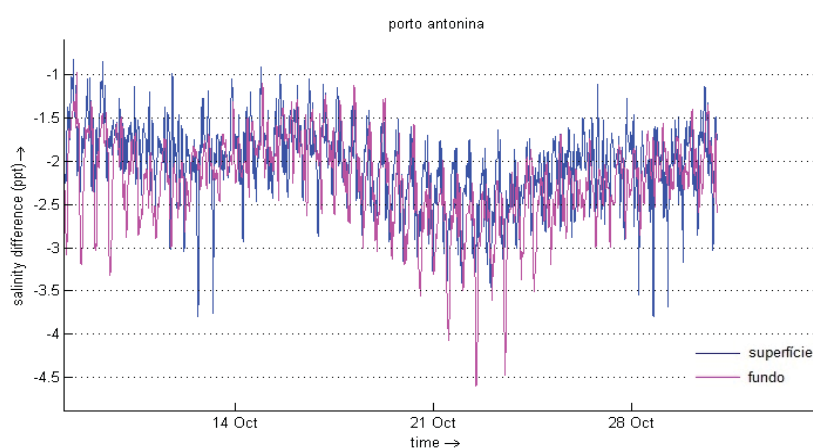


Figura 5.41 – Diferença de salinidade no ponto de observação “porto antonina” (cenário base – cenário dragado).

Os resultados negativos do gráfico anterior indicam aumento da salinidade tanto na superfície quanto no fundo. A variação foi de pelo menos 1,5 psu em todo o período, sendo mais expressiva na maré de sizígia, onde o incremento salino no fundo foi de até 4,5 psu após a dragagem.

A Figura 5.42 apresenta as estratificações dos dois cenários e a diferença entre eles no ponto “porto antonina”.

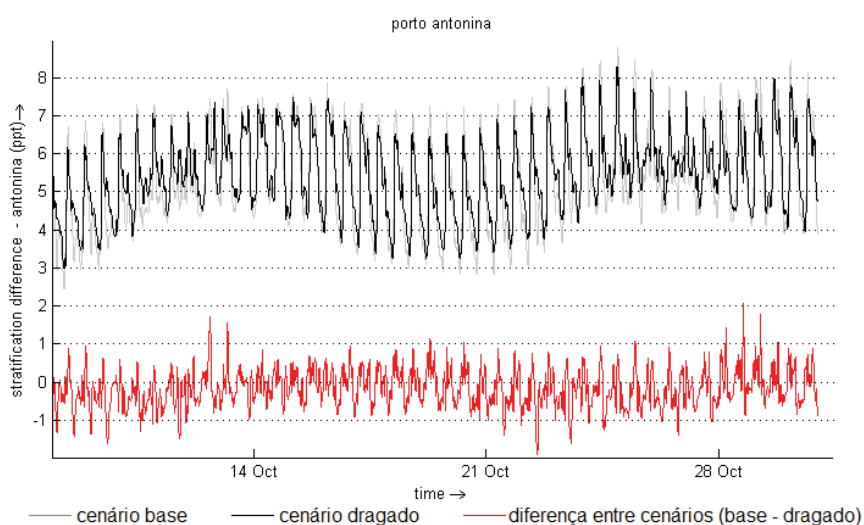


Figura 5.42 – Estratificação no ponto de observação “porto antonina”, nos cenários base e dragado e respectiva diferença entre eles.

A avaliação da estratificação nesse ponto apontou resultados similares ao ponto “porto paranagua” quanto a intensidade desse fenômeno durante as marés de sizígia e de quadratura, tendo essa última maior estratificação nos dois cenários. A diferença de estratificação salina após a dragada fica oscilando em zero, indicando que o aumento da salinidade ocorre em magnitudes próximas, tanto na superfície quanto no fundo.

Nos tempos definidos para as avaliações foram gerados gráficos espaciais de diferença de salinidade para superfície e fundo (Figura 5.43 à Figura 5.48)

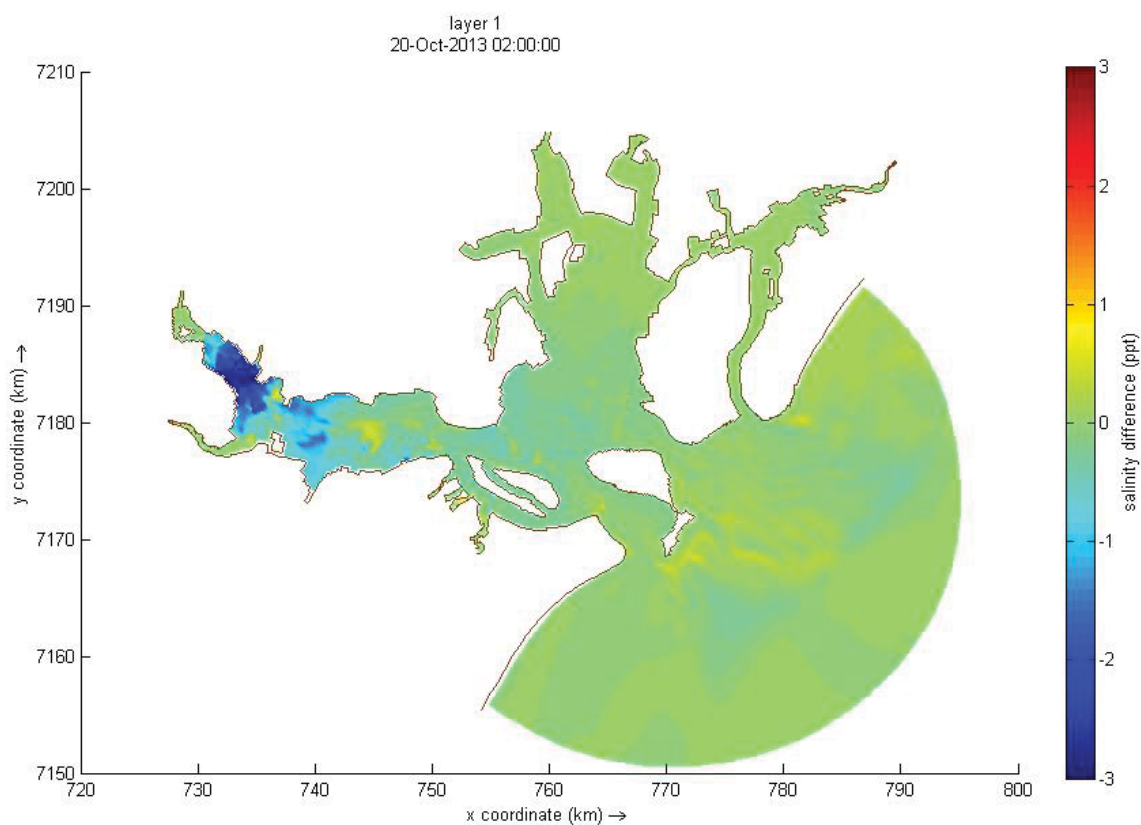


Figura 5.43 – Diferença na salinidade na superfície às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

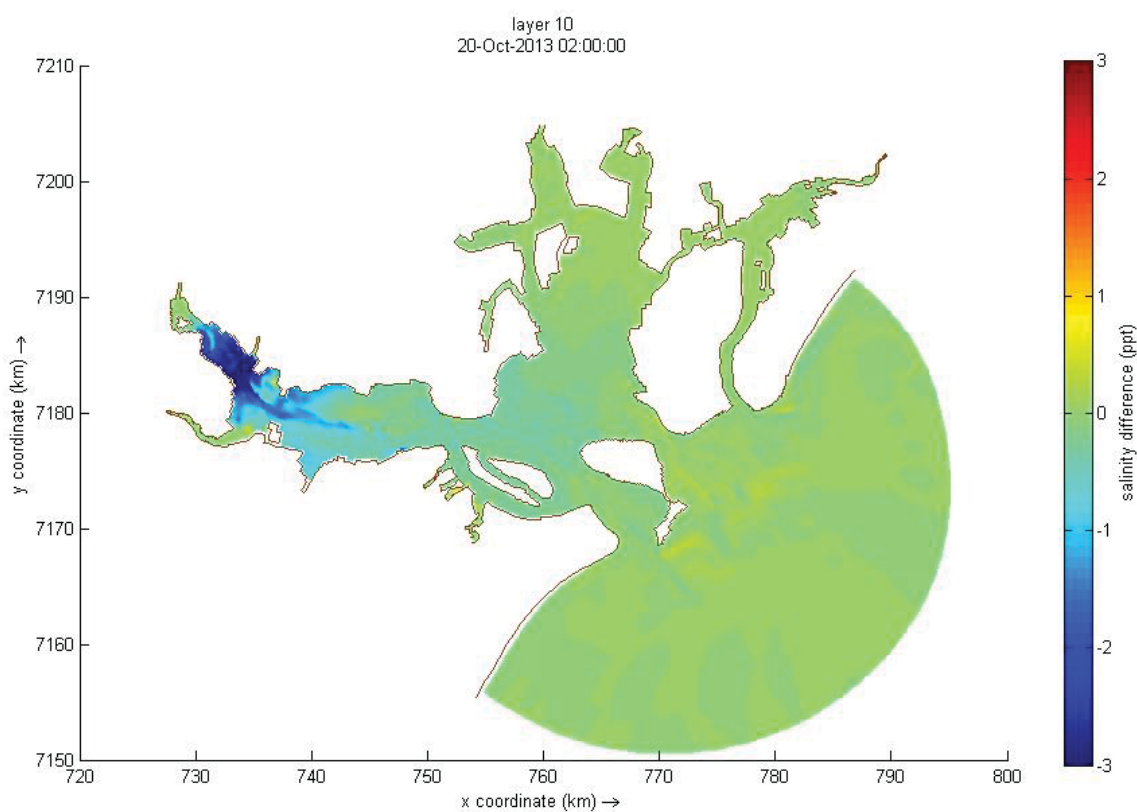


Figura 5.44 – Diferença na salinidade no fundo às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

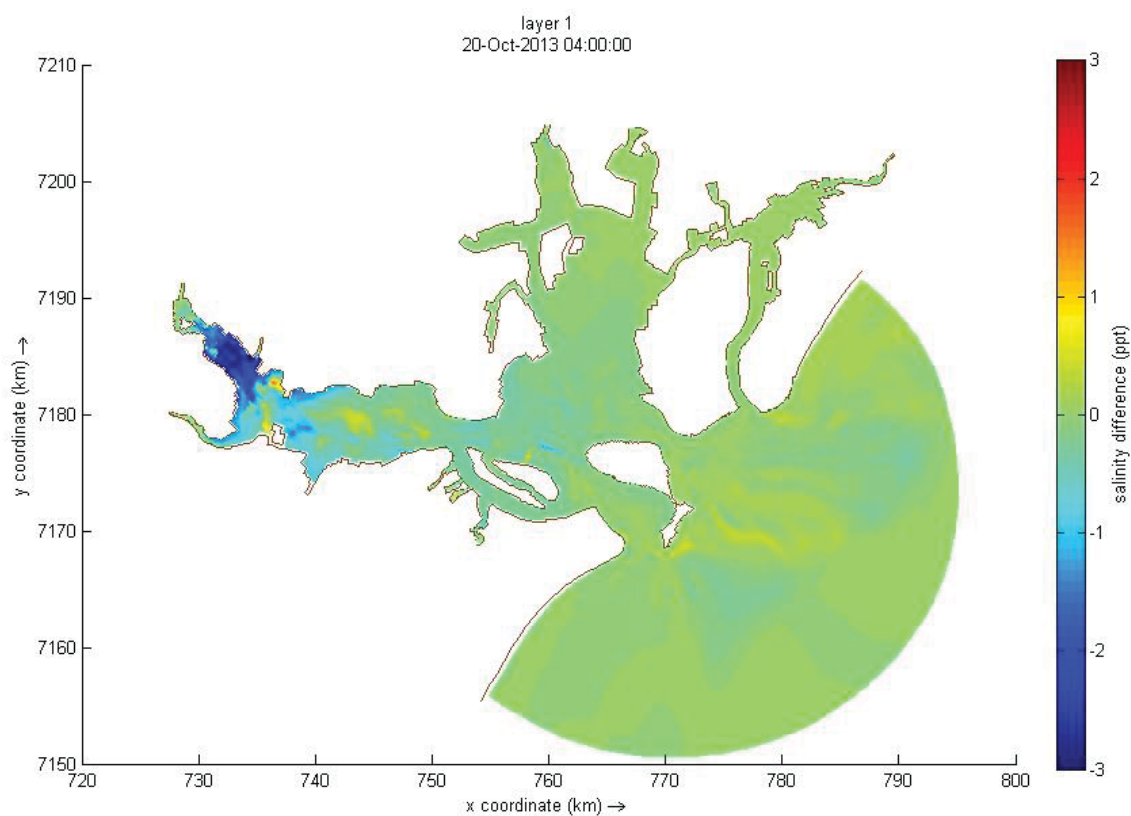


Figura 5.45 – Diferença na salinidade na superfície às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

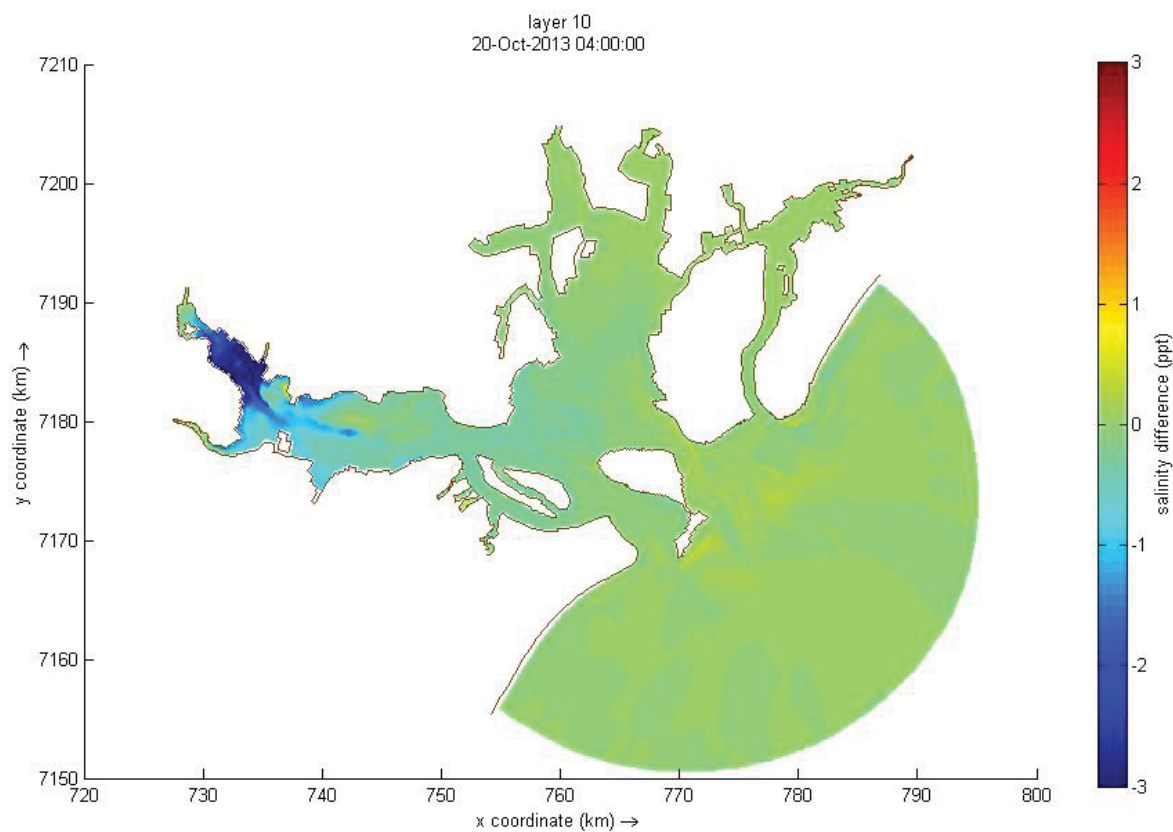


Figura 5.46 – Diferença na salinidade no fundo às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

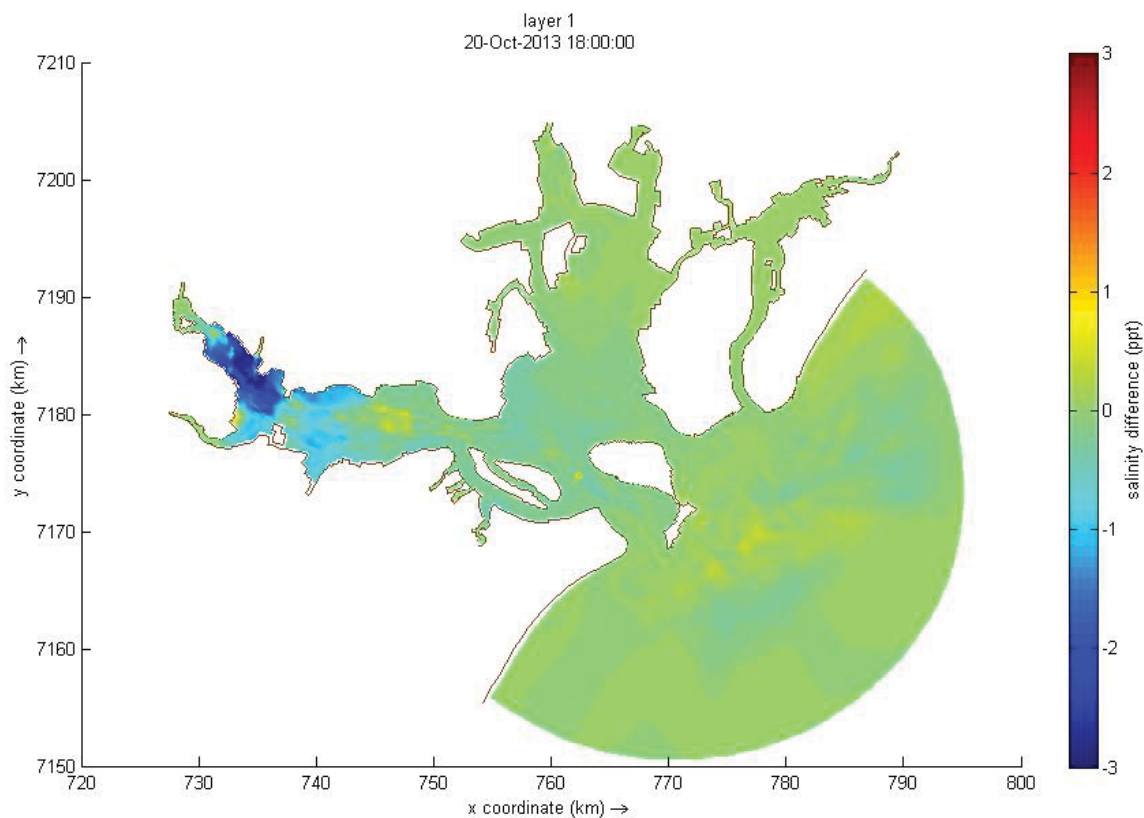


Figura 5.47 – Diferença na salinidade na superfície às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

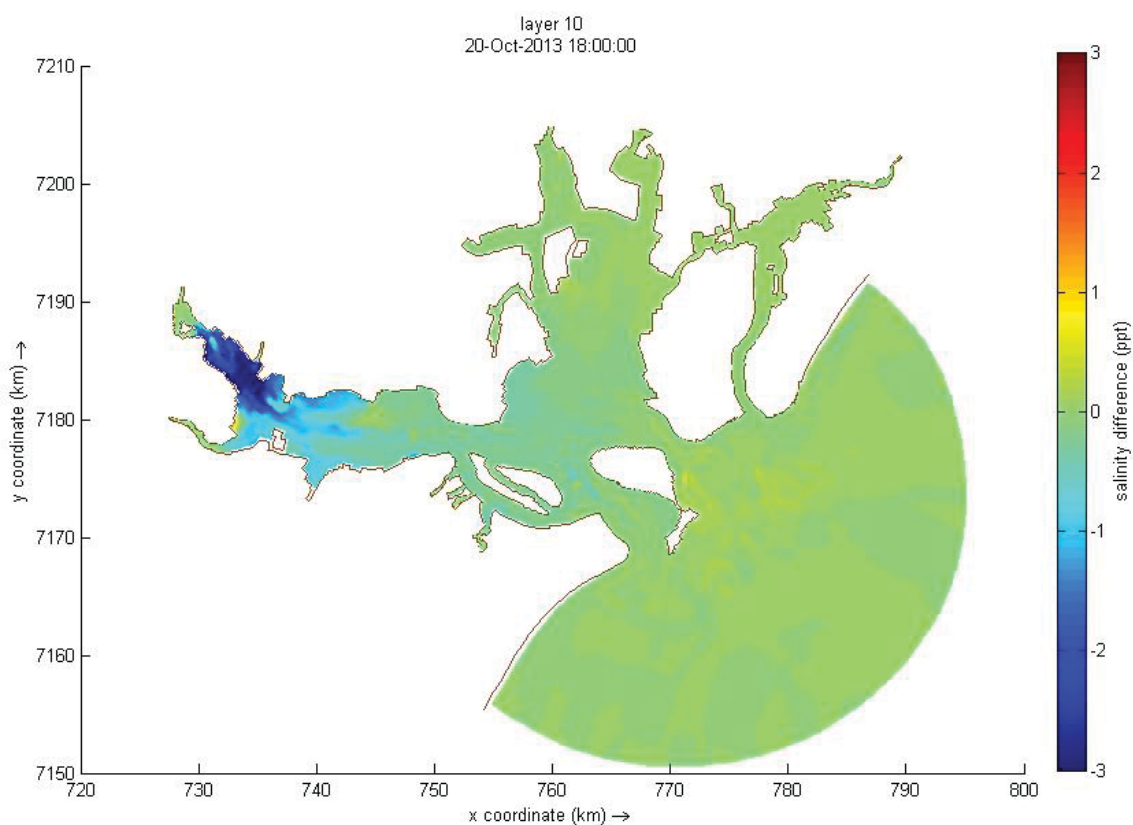


Figura 5.48 – Diferença na salinidade no fundo às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

A variação de salinidade ocorre em quase todo o estuário e em magnitudes similares, onde a salinidade é aumentada após a dragagem. A interferência da dragagem é mais evidente nas regiões que tiveram a batimetria alterada com maior intensidade e também próximo aos rios. Na região de Antonina nota-se o maior aumento da salinidade, com variações de 3 psu na superfície e no fundo, e em todos os horários. Esse aumento de salinidade representa 20% de variação em alguns trechos

A salinidade no leito é um pouco mais impactada do que a superfície. E na camada superficial em todos os horários observados é possível identificar a redução da salinidade no canal portuário no trecho entre Paranaguá e Antonina. Nesse local acusam valores de pelo menos 0,5 psu e até 0,7 psu.

As alterações do comportamento salino quanto ao perfil da seção adotada ratificam a variação da salinidade ao longo do estuário, com aumento de concentração salina. Os perfis são representadas nos três tempos escolhidos (2:00, 4:00 e 18:00 do dia 20/10/2013), na Figura 5.49, Figura 5.50 e Figura 5.51.

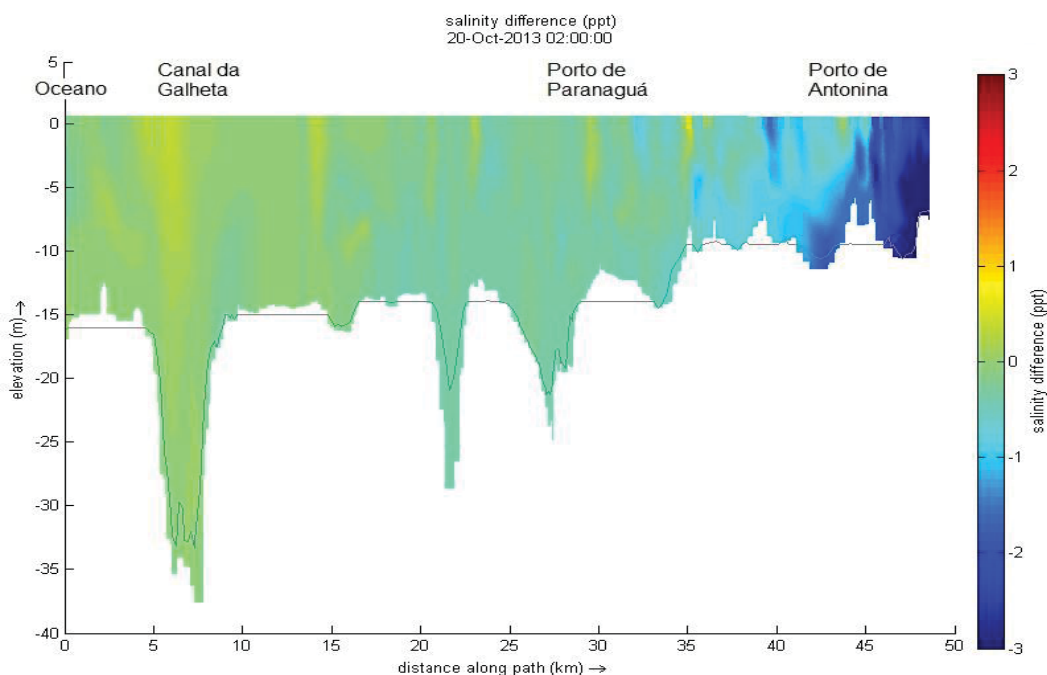


Figura 5.49 – Diferença na salinidade às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

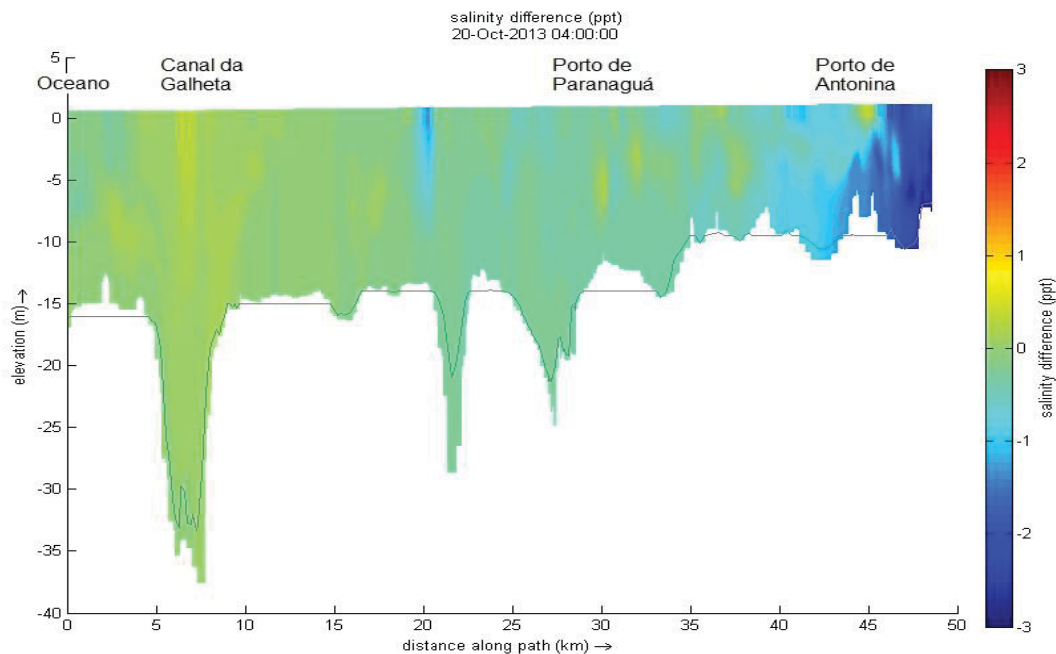


Figura 5.50 – Diferença na salinidade às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

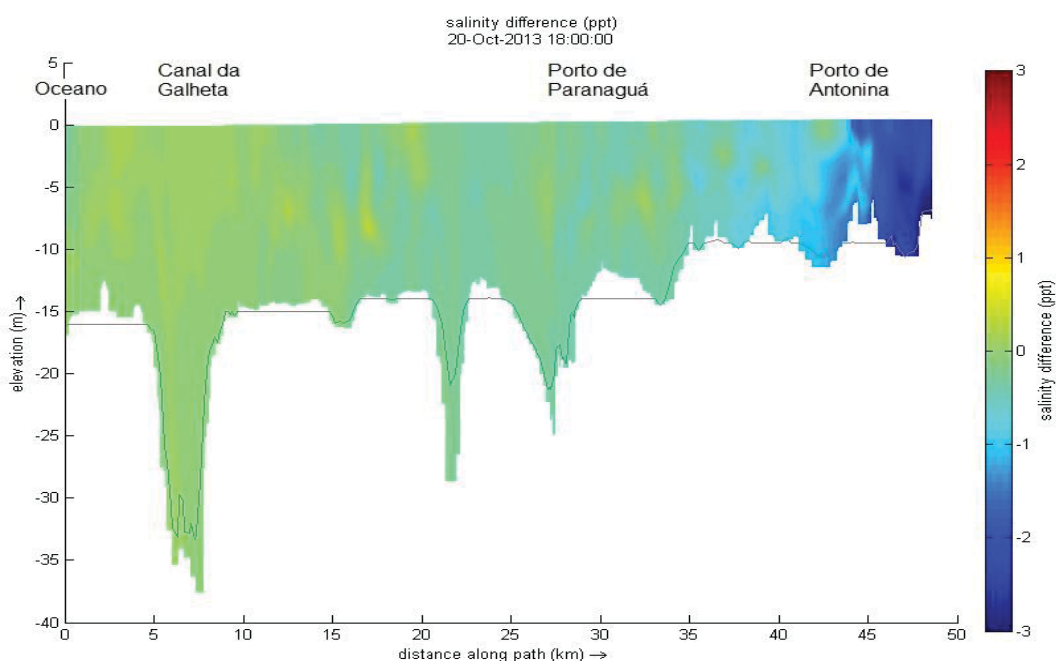
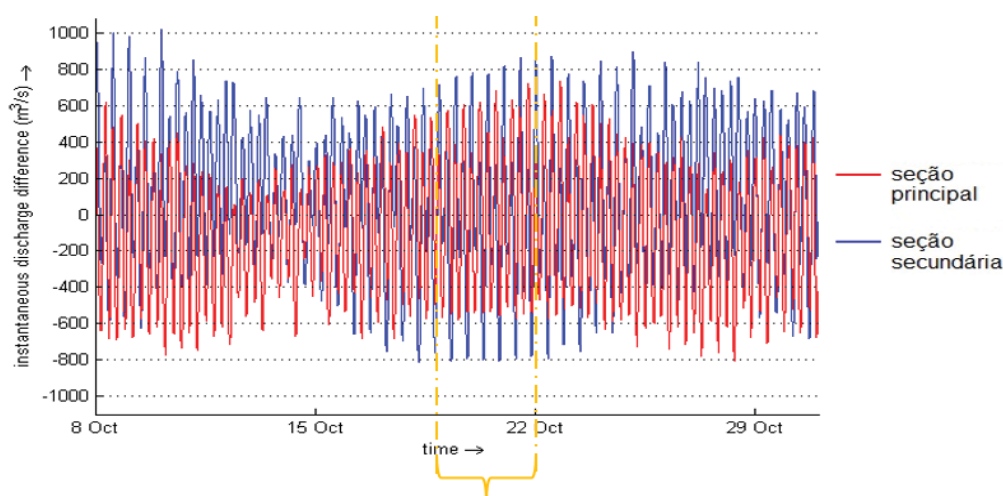


Figura 5.51 – Diferença na salinidade às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

As análises feitas da seção longitudinal ratificam as dos gráficos espaciais, com aumento da salinidade a partir do KM 15 da seção longitudinal, onde a variação fica em torno de 0,5 psu. Porém é o impacto é intensificado na região de Antonina, à montante do estuário, onde o aumento da concentração salina chega a 3 psu – especialmente no fundo. No horário de preamar a variação de salinidade se mostra singelamente menor.

5.2.3 Vazão

Analizou-se, em ambos os cenários, as vazões nas seções de observações, “secao principal” e “secao secundaria”. Desse modo alterações das vazões nessas duas seções puderam ser valoradas. A Figura 5.52 e a Figura 5.53 apresentam a diferença de vazão instantânea entre o cenário base e o cenário dragado, em ambas as seções.



Z

Figura 5.52 – Diferença entre os cenários nas vazões instantâneas nas duas seções e no período calibrado.

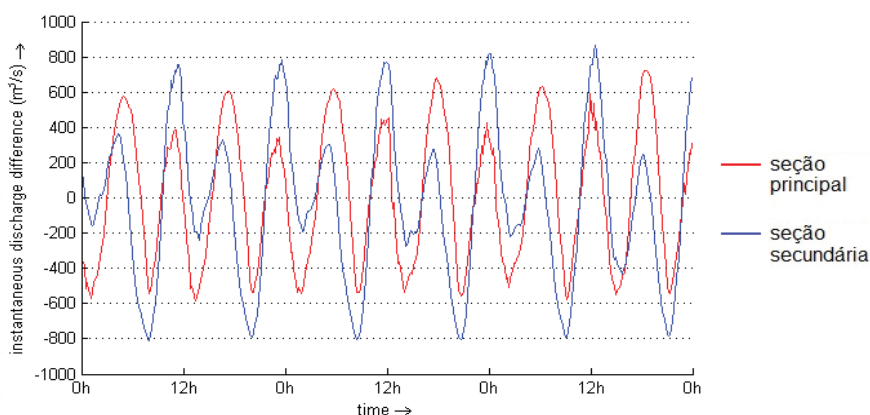


Figura 5.53 – Diferença entre os cenários nas vazões instantâneas nas duas seções – período 19/10 – 21/10.

O cenário dragado apresentou variação de vazão na “secao principal” – a qual contempla o canal portuário de Paranaguá – na ordem de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. A leste da ilha do Mel, a variação de vazão na “secao secundaria” foi de $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor representa até 5% da variação na seção principal e de 4% na secundária, nesse mesmo período.

É possível observar na Figura 5.53, nos dias 19, 20 e 21 de outubro, as variações conforme o período diário nas duas seções. Nelas as alterações causadas pela dragagem positivas e negativas possuem magnitudes semelhantes.

A Figura 5.54 apresenta as vazões acumuladas para as duas seções, dos dois cenários e a diferença entre eles.

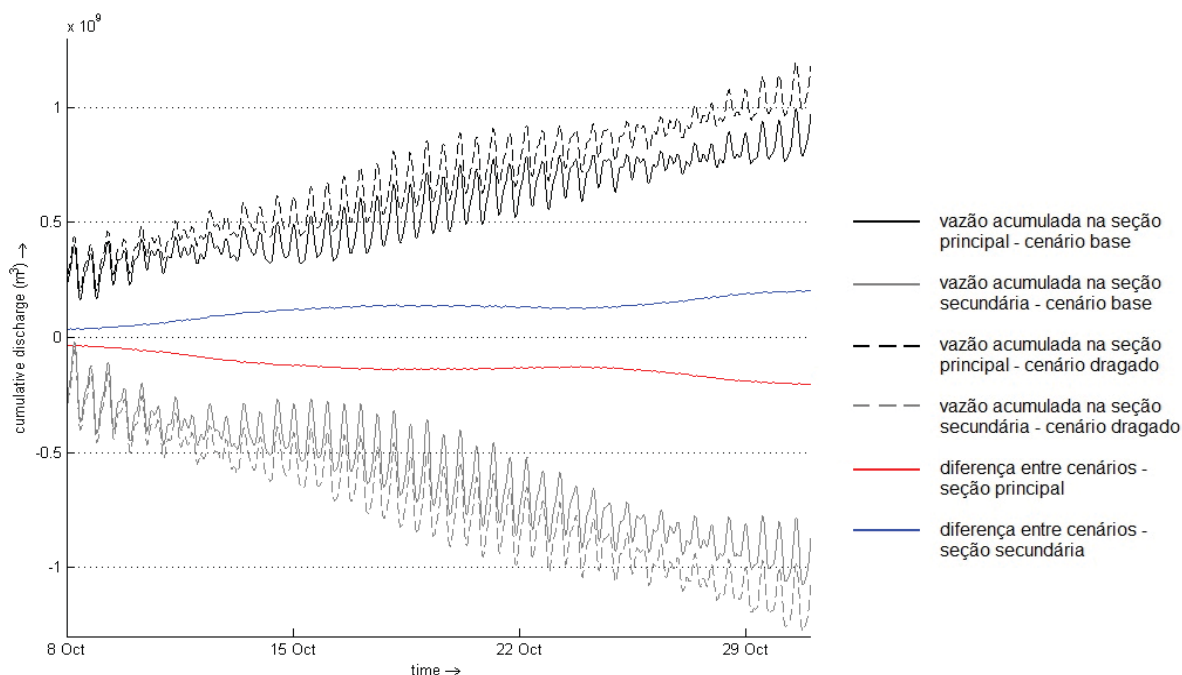


Figura 5.54 – Vazões acumuladas nos dois cenários e diferença entre eles, nas duas seções e no período calibrado.

Na análise do gráfico anterior é possível concluir que em ambas as seções o efeito da dragagem aumentou a vazão, o qual foi percentualmente similar para ambas as seções. A variação da vazão cumulativa ao final da análise de um mês é de pouco mais de $18 \text{ bi m}^3/\text{s}$ nas duas seções.

Dados de temperatura também foram analisados, mas as variações, tanto espacial no mesmo cenário, quanto entre cenários são muito singelas. A maior diferença entre o cenário base e o dragado foi de $0,03^\circ\text{C}$, o que representou em torno de $0,08\%$ da temperatura base. Será apresentada no APÊNDICE 1, o horário de maior alteração da variação de temperatura.

Em um primeiro momento foi feita uma simulação de um cenário de dragagem mais sutil, com cotas máximas de $12,5 \text{ m}$. Comparadas a este capítulo, as alterações do cenário base para este primeiro cenário dragado foram bem menores e podem ser visualizadas no APÊNDICE 2.

6 CONCLUSÕES

Em uma modelagem computacional representante do Complexo Estuarino de Paranaguá, foi aplicada uma grade curvilínea para avaliar os efeitos da dragagem no estuário. As condições de contorno foram desenvolvidas para o mês de outubro de 2013, sendo considerado constantes harmônicas de maré e descargas fluviais, cada um com suas especificidades de salinidade e temperatura. O modelo foi validado através da comparação entre dados maregráficos, que apresentou estatisticamente valores condizentes à realidade do local. No cenário base o erro médio foi de -0,0009 m e o Coeficiente Nash-sutcliffe igual a 0,7209.

Para a avaliação quantitativa da interferência da dragagem a batimetria no decorrer do canal portuário foi manipulada. Adotando profundidades mínimas de 14,0 m até o Porto de Paranaguá e de 9,5 m até o Porto de Antonina. As velocidades e salinidades no cenário base foram avaliadas pontualmente, em forma de gráfico espacial e em seção longitudinal, possibilitando uma visão tridimensional do modelo.

No cenário base as velocidades geradas no modelo chegaram a magnitudes médias de 1,2 m/s, as quais foram identificadas no horário de vazante, 18 h. Na análise em perfil observa-se que as velocidades superficiais possuem correntes mais intensas, especialmente no início do estuário. Quanto à salinidade, a maior parte da região apresenta águas com 20 a 30 psu de sal, com exceção das áreas próximas às foz dos rios (à montante do estuário), onde a salinidade fica próxima a 0 psu. No perfil da seção definida a cunha salina é facilmente identificada, com estratificação das águas mais salgadas, variando em até 4 psu entre superfície e fundo, em um mesmo ponto.

Os efeitos da dragagem foram quantificados subtraindo os resultados do cenário dragado dos resultados do cenário base. A variação da velocidade média é identificada em alguns locais do canal portuário, reduzidas entre 0,03 e 0,04 m/s, sendo que no regime de vazante uma região maior é afetada. Próximo ao Porto de Antonina e na bacia de evolução do Porto de Paranaguá essa variação é mais expressiva, chegando a 0,1 m/s, o que representa por volta de 20% da velocidade base. Na avaliação em seção percebe-se que as correntes superficiais se alteraram mais, reduzindo em até 0,15 m/s e ocorrendo em locais de profundidade maior.

Quanto à salinidade avaliou-se também a variação da estratificação. Ambos os cenários apresentaram comportamentos semelhantes, com aumento de salinidade tanto na superfície quanto no fundo, mantendo a estratificação.

As variações de salinidade na área modelada ocorrem em quase todo o estuário, com redução de 0,5 psu da concentração de sal. A região mais afetada pela dragagem foi à montante do estuário, próximo a Antonina, onde houve aumento de 3 psu na concentração de sal. Na seção longitudinal notou-se que o aumento da salinidade nas camadas inferiores é singelamente mais expressivo.

Quanto às vazões, a dragagem estimulou o aumento delas, tanto no canal principal como no secundário no período de sizígia. Avaliadas nas duas seções de observação, incrementou de 600 a 800 m³/s para cada seção, o que representa de 4 a 5% de variação de vazão.

Através da análise tridimensional o modelo foi capaz de expor as interferências geradas por dragagem no estuário, sobretudo das variações de velocidade, e salinidade. Fatores que devem ser considerados no planejamento portuário para zelar tanto pela segurança da navegação quanto pela conservação do meio biótico. Assim ressalta-se a importância de estudos relacionados às interferências dessas mudanças.

Mais estudos devem ser feitos a fim de quantificar todos os benefícios e malefícios de uma obra de dragagem. Os dados sedimentológicos podem ser acoplados com maior detalhamento e devem ser avaliados quanto ao transporte de sedimentos, movimentação do leito, possíveis assoreamentos, etc. Assim destaca-se a importância incluir simulações durante o período de obra, para quantificar os impactos no processo de dragagem, o qual estimula a suspensão de sedimentos.

Eventos de frentes-frias, com variações de pressão atmosférica, perturbam o regime estuarino. A alteração física do canal pode influenciar na resposta hidrodinâmica às ocasiões meteorológicas extremas. Sendo importante a avaliação conjunta dos dois eventos (dragagem e frente-fria).

Mesmo com esses parâmetros a serem complementados no modelo computacional, pôde-se provar que há alterações no regime hidrodinâmico e físico, do estuário ao aumentar a profundidade do canal portuário. E as regiões mais afetadas são as mais internas, próximas aos rios, principalmente no aumento da intrusão salina.

REFERÊNCIAS

ALFREDINI, ARASAKI P.; Arasaki E.: **Engenharia portuária** – Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2013

ALFREDINI, P.: **Obras e Gestão de Portos e Costas – A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental** – Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2005

AYRES, S. K. **A simulation of the Mississippi River salt wedge estuary using a three-dimensional cartesian Z coordinate model**. Ph.D. Thesis. University of New Orleans, 2015.

CAMARGO, R. 1998. **Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá**. Tese de doutorado - Instituto Astronômico e Geofísico/USP.

CAMARGO, R.; MARONE, E.; SILVA DIAS, P. L. **Deteção do sinal de brisa no registro de vento de Pontal do Sul (PR)**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sbmec, 1996. p. 1036-1040.

CARVALHO, Newton de O; JÚNIOR, Naziano P. F. SANTOS, Paulo M. C. dos. S.; LIMA, Jorge E. F. W. **Guia de práticas sedimentológicas**: Agência Nacional de energia elétrica. Brasília, 2000.

CARVALHO, N. O.; **Hidrossedimentologia prática: Interciência**. 2ªed., rev., atual. e ampliada. Rio de Janeiro, 2008.

DEAN, R. G. & DALRYMPLE, R. A., 2004. **Coastal Process with Engineering Application**. Cambridge: Cambridge University Press.

DANILO R. VIEIRA | OCEANÓGRA. **IOF1202-Oceanografia Física Descritiva**, 2018. Acesso em 30 mar. 2019.

DELTARES. **Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments.** Delft3D-FLOW User Manual, 2014.

DRONKERS, J. (1986). Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, p.117-31.

FALCONER, R.; LIN, B. (1996). Three-dimensional modelling of water quality in the Humber Estuary. **Water Resources**, v. 31, n. 5, p. 1092-1102.

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

HARARI, J.. **Fundamentos de Modelagem Numérica em Oceanografia.** 1. ed. São Paulo - SP - Brasil: Editoração da SALT Sea & Limno Technology, 2015. v. 1. 246p .

HEERLING, G. (2003) **Development of a numerical model for the Paranaguá Bay in Brazil.** Coastal Research Laboratory Institute of Geosciences. Christian Albrechts University, Kiel, Germany.

HYDRAULICS, Delft. Delft3D-Flow user's manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. **WL Delft Hydraulics, Netherland**, 2014.

JANSEN, P. P.; BENDEGOM, L. V.; BERG, J. V.; VRIES M.; Zanen, A. **Principles of River Engineering.** Pitman Publishing Limited, 1979

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

LACERDA, Kaio Calmon. (2016) **Modelagem Hidrodinâmica e do Transporte de Sedimentos da Baía de Vitória, ES: Impacto Do Aprofundamento Do Canal Estuarino do Porto de Vitória.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

LAMOUR, M.R.; SOARES, C.R.; CARRILHO, J. C. **Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR.** Boletim Paranaense de Geociências. n 55. 2004

LANA, P. C., MARONE, E., LOPES, R. M., MACHADO, E. C., The subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, in: Seeliger, U., Kjerfve, B. (Eds.), **Coastal Marine Ecosystems of Latin America.** Ecological Studies, pp. 131-145. 2001.

LE HIR, P. et al. (2000). **Characterization of intertidal flat hydrodynamics.** Continental Shelf Research. v. 20, p. 1433–1459.

LOPES, G. M. (2010). **Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina-PR.** Dissertação de mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos – Setor de Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2010.

MANTOVANELLI, A. (1999a). **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem.** Curitiba. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MANTOVANELLI, A. (1999b). **Processos condicionantes da zona de máxima turbidez nas baías de Antonina e Paranaguá.** In: Semana 114 Nacional de Oceanografia, 12., Rio de Janeiro. Resumos Expandidos. p. 295-297.

MARONE, E., MACHADO, E.C., LOPES, R.M., SILVA, E.T. da, **Land-ocean fluxes in the Paranaguá Bay estuarine system, southern Brazil.** Brazilian J. Oceanogr. 53, 169-181. 2005.

MASSELINK, G.; HUGHES, M., (2003). **Introduction to Coastal Processes and Geomorphology.** London: Arnold.

MAYERLE, R. NARAYANAN, R. TALAL, E., KHAIRI, A., WAHAB, A. **A case study of sediment transport in the Paranaguá Estuary Complex in Brazil.** Ocean Engineering, v. 106, p. 161-174, 2015.

MEDEIROS, A. D. **A influência da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu.** Master Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

MIRANDA, T. F. V. B. (2016). **Resposta da Hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá-PR a Sistemas Frontais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MIRANDA, L. B. **Sistemas estuarinos de planície costeira: estrutura dinâmica, processos de mistura e aplicações.** In: SIMPOSIO DE ECOSSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA: estrutura, função e manejo, 2., Águas de Lindóia, SP. Anais. Águas de Lindóia, SP: ACIESP, v. 71, n. 2, p. 1-46. 1990.

MIRANDA, L., B de; CASTRO, BM de; KJERFVE, Björn. **Princípios de oceanografia física de estuários.** São Paulo: EDUSP, 2002.

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

OLIVEIRA, L.L.; VIANELLO, R.L.; FERREIRA N.J. **Meteorologia Fundamental.** Erichim, RS: EDIFAPES, 2001. 432 p.

PINET, P. R. **Invitation to oceanography.** Jones & Bartlett Publishers, 2011.

PINTO-COELHO, R. M.; HAVENS, K. **Gestão de recursos hídricos em tempos de crise.** Editora Artmed, 2016.

POPP, José H. **Geologia geral**. 5ed. Rio de Janeiro, LTC – Livros técnicos e científicos editora S.A. 1998.

PRITCHARD, Donald W. **Estuarine hydrography**. In: **Advances in geophysics**. Elsevier, 1952. p. 243-280.

RIDD, P. V.; STIEGLITZ, T. Dry season salinity changes in arid estuaries fringed by mangroves and saltflats. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 54, n. 6, p. 1039-1049, 2002.

RIJN, L. C. VAN. **Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas**. WL | Delft Hydraulics, 1993

RIJN, L. C. VAN; WALSTRA, D. J. R. **Modelling of Sand Transport in Delft3D**. WL | Delft Hydraulics, 2003.

Richardson, J. F. and Zaki W. N. **Edimentation and fluidization: Part I**. I. Trans. Institution of Chemical Engineers 32: 35–53. 78, 325, 1954.

SANTOS, P. S. **Ocupação Antrópica e Problemas de Ordenamento**, Universidade de Coimbra, 2009.

SCHIJF, J. B. & SCHONFELD, J. C. 1953 Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water. **Proc. Minn. Intl Hydraulics Conv., University of Minnesota**.

SHIELDS, A. **Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement**. Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 1936.

SOARES, C. R.; ANGULO, R. J. & LESSA, G. C. 1997. Publicação especial número 2: **Roteiro da excursão ao litoral do estado do Paraná: morfodinâmica de ambientes atuais, evolução da planície durante o quaternário e problemas de erosão costeira**. VI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA) e Reunião do Quaternário da América do Sul. CuritibaPR, 125 p.

SOCOLOFSKY, Scott A.; JIRKA, Gerhard H. **Special topics in mixing and transport processes in the environment**. Engineering–Lectures. 5th Edition. Texas A&M University, 2005.

SUGUIO, K.: **Introdução à Sedimentologia**. Editora Blücher – EDUSP, São Paulo, 1973.

TAMURA, Mauro Massanari. (2017) **O processo de sedimentação no canal de acesso aos portos do complexo estuarino de Paranaguá**. 2017. Dissertação de Mestrado no programa em de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TWILLEY RR, SNEDAKER RR, YÁÑEZ-ARANCIBIA SC AND MEDINA A. 1996. **Biodiversity and ecosystem processes in tropical estuaries: perspectives of mangrove ecosystems**. In: Mooney HA, Cushman JH, Medina E, Sala OE and Schulze E-D (Eds), *Functional Roles of Biodiversity: a Global Perspective*, J Wiley & Sons Ltd., New York, p. 327-370.

APÊNDICE 1

As variações de temperatura identificadas entre as simulações foram muito singelas, em todos os horários medidos variaram menos do que 0,04 °C, tanto na superfície quanto no leito. A título de demonstração, a Ilustração 1 apresenta a variação de temperatura, na superfície às 18 horas. Um pequeno esfriamento dentro do estuário pode ser observado, porém com variações inferiores a 1%.

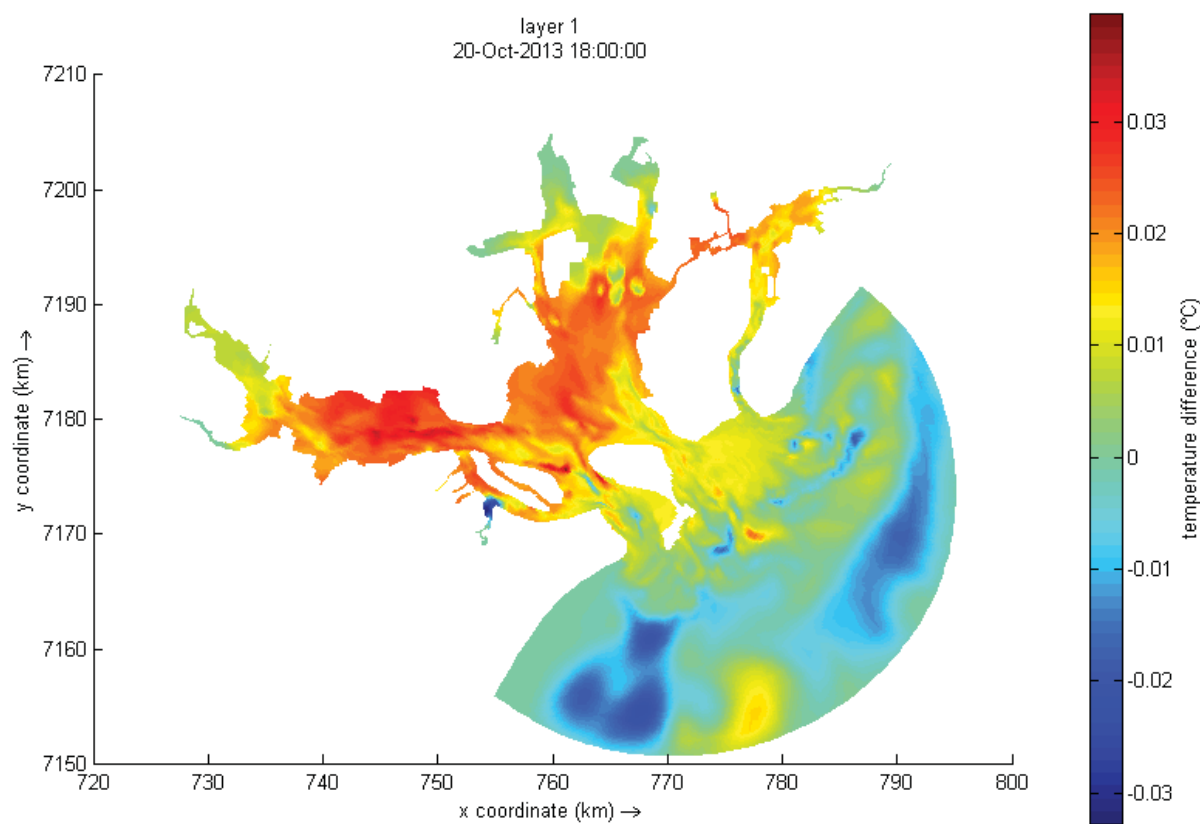


Ilustração 1 – Diferença na salinidade na superfície às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

APÊNDICE 2

Em um primeiro momento a alteração da batimetria simulada para representar o cenário dragado, foi definida a partir do plano no plano avaliação de sedimento, da Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (Ilustração 2). O qual apresentava cotas de profundidade previstas de pelo menos 12,5 m até o Porto de Paranaguá, e de 9,5 m até o Porto de Antonina (Ilustração 3).

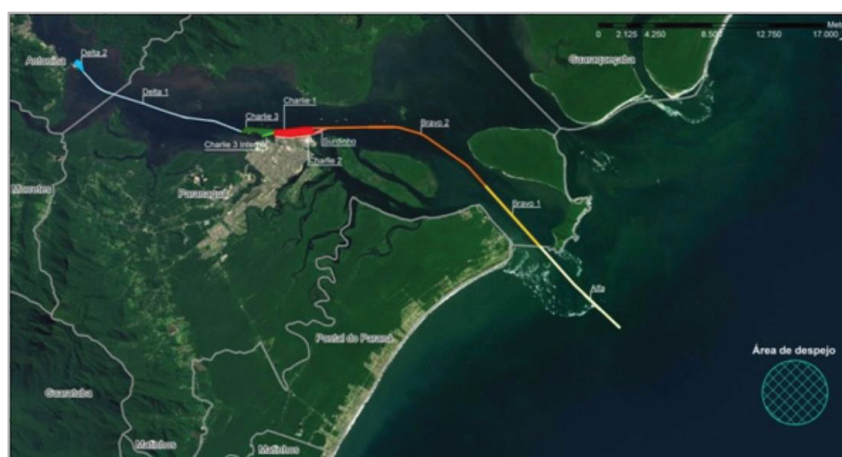


Ilustração 2 – Região de dragagem prevista no canal portuário de Paranaguá e área de despejo de sedimentos.

Fonte: APPA, 2018.

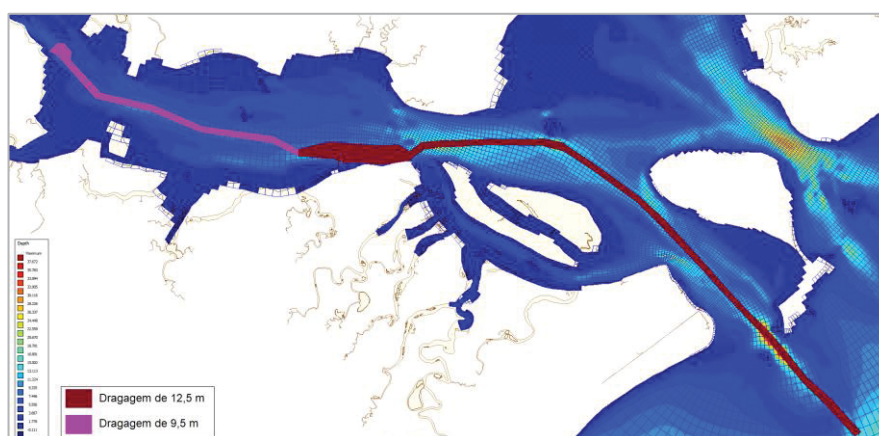


Ilustração 3 – Batimetria alterada no modelo.

A Ilustração 4 apresenta a variação do nível do leito após a batimetria alterada para o primeiro cenário dragado. As maiores alterações ocorrem do Porto de Paranaguá até o Porto de Antonina. O canal portuário até o início da região portuária de Paranaguá não sofreu muitas alterações quanto a batimetria.

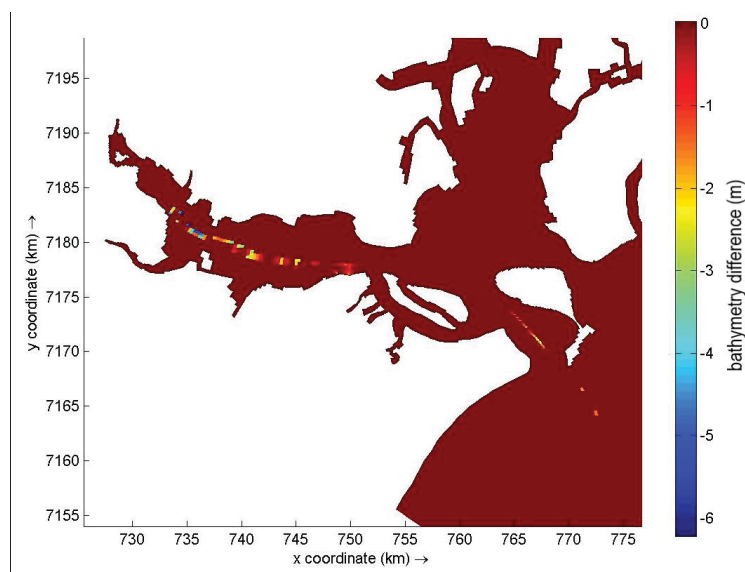


Ilustração 4 – Diferença de batimetria.

Para a comparação de resultados no decorrer do canal portuário usou-se a mesma seção apresentada no capítulo 4 (Figura 4.8). E na Ilustração 5 está indicado as batimetrias do cenário base e dragado nessa seção, podendo observar a diferença de batimetria entre eles, a qual tinha pouca variação.

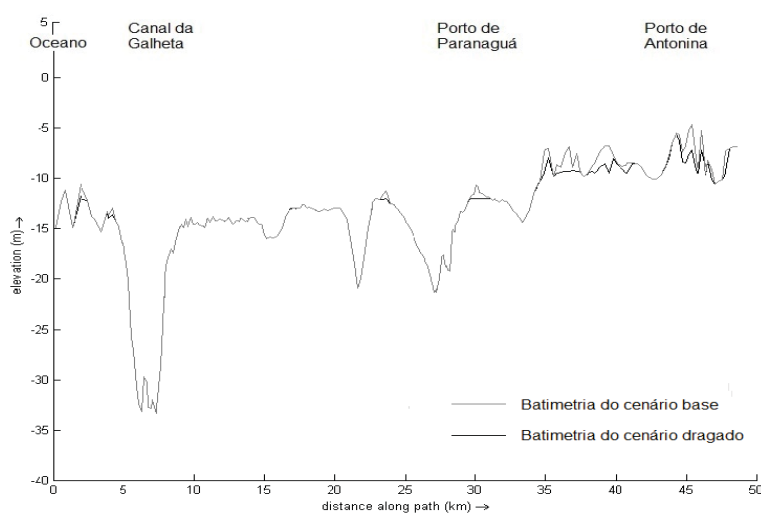


Ilustração 5 – Corte da grade ao longo do canal de navegação.

VARIAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

Velocidade

A Ilustração 6 e a Ilustração 7 representam as velocidades nos pontos “Entrance” e “Canal 5 – porto”, nos sentidos x e y. No mesmo período em que as

velocidades no cenário base foram avaliadas, entre os dias 19/10/2013 e 22/10/2013 expõem-se os resultados dos dois cenários e as variações entre um e outro.

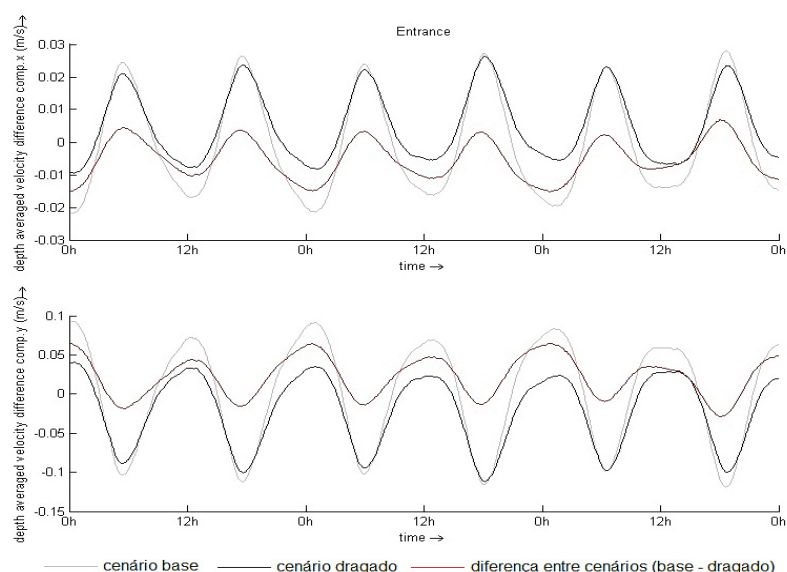


Ilustração 6 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto Entrance.

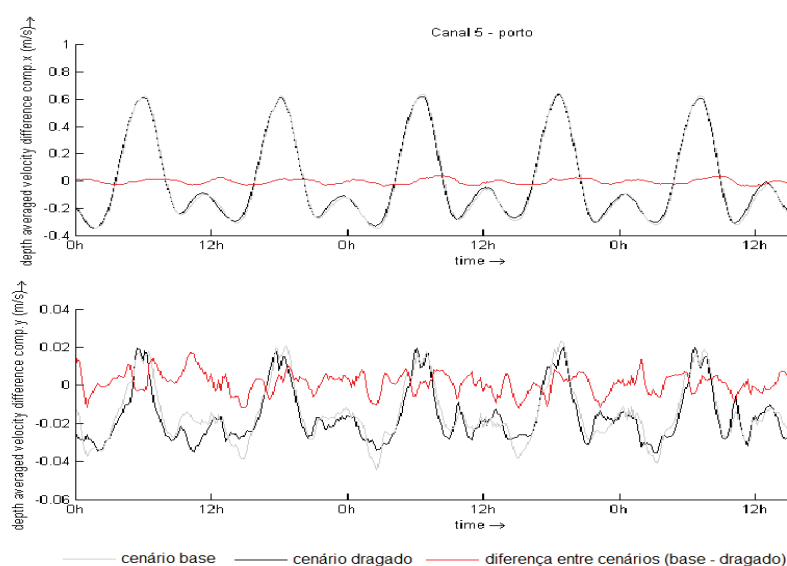


Ilustração 7 – Velocidades nas direções x e y nos dois cenários e diferença entre elas – ponto Canal 5 - porto.

Ambos os cenários apresentaram comportamentos de correntes bastante parecidos quanto ao regime. Contudo as amplitudes dessas velocidades são menores no cenário dragado, especialmente na entrada do canal portuário, onde a diferença chega a ser de 0,065 m/s e ocorre nos períodos de enchente do estuário. Nos arredores do Porto as variações não são tão expressivas na direção principal, mas também apresenta diminuição de magnitude.

As diferenças das médias de velocidades ao longo das camadas estão ilustradas em gráficos espaciais a seguir. Manteve-se o padrão de avaliação no dia 20/10/2013 nos horários de enchente, de cota máxima, e de vazante do estuário, conforme a Ilustração 8, a Ilustração 9 e a Ilustração 10, respectivamente.

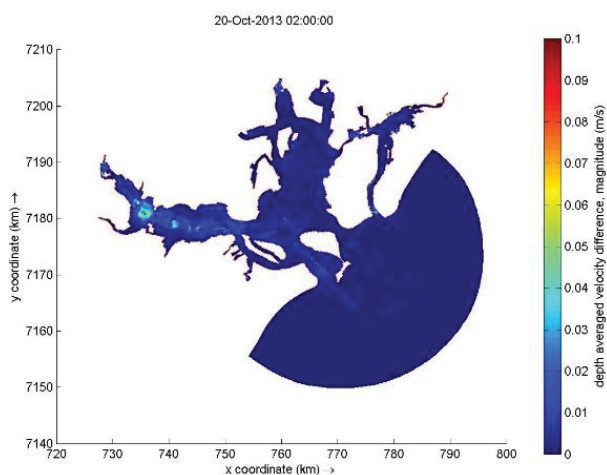


Ilustração 8 – Diferença na magnitude da velocidade média às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

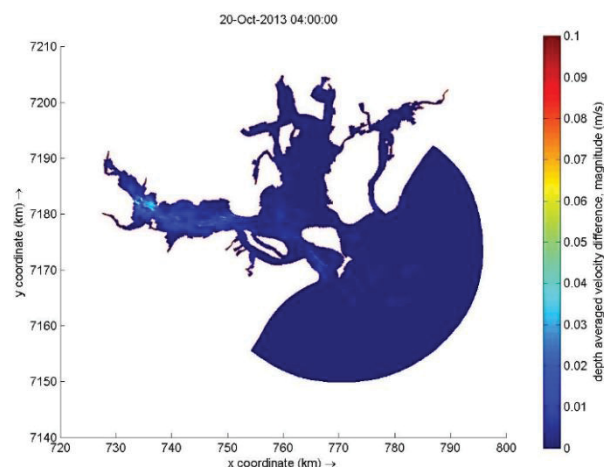


Ilustração 9 – Diferença na magnitude da velocidade média às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

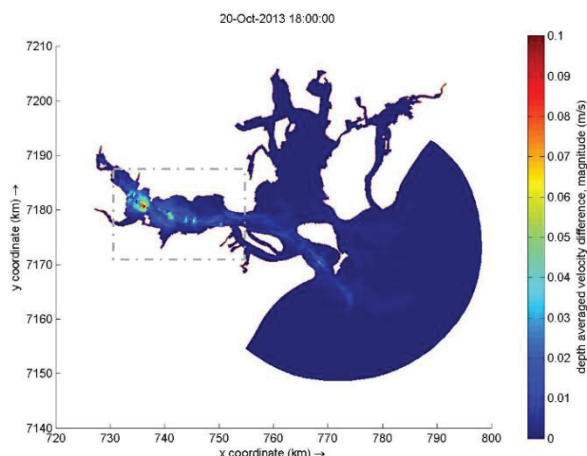


Ilustração 10 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

Pequenas alterações de velocidades são diagnosticadas no canal portuário, sendo maiores próximo ao Porto de Antonina. Dentre os horários observados o que apresentou maior variação foi o de vazante, às 18:00, com reduções de velocidade de até 0,09 m/s (destacado no gráfico anterior). A Ilustração 11 apresenta essa mudança em vetores.

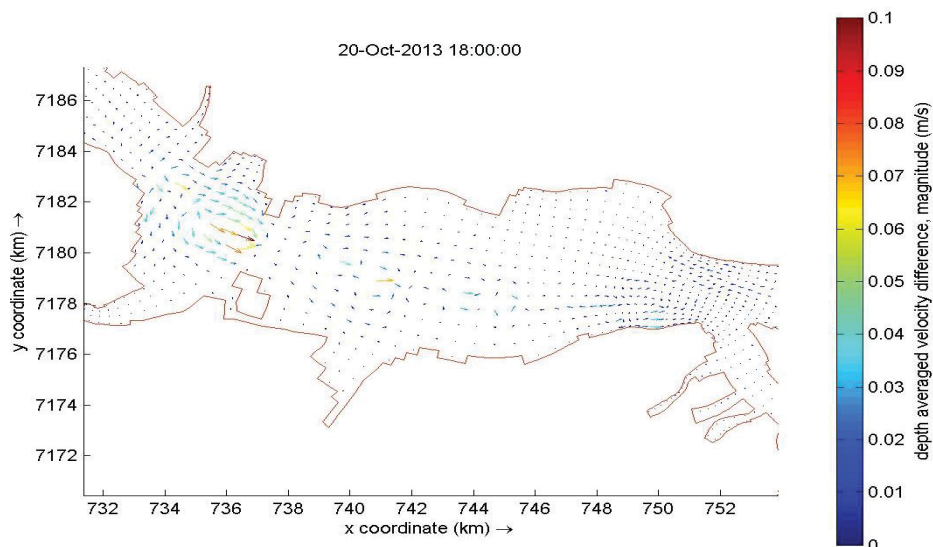


Ilustração 11 – Diferença na magnitude da velocidade média às 18:00 (cenário base – cenário dragado), na região portuária.

No que tange o perfil da seção adotada, os impactos da dragagem nas velocidades estão representados na Ilustração 12, Ilustração 13 e Ilustração 14.

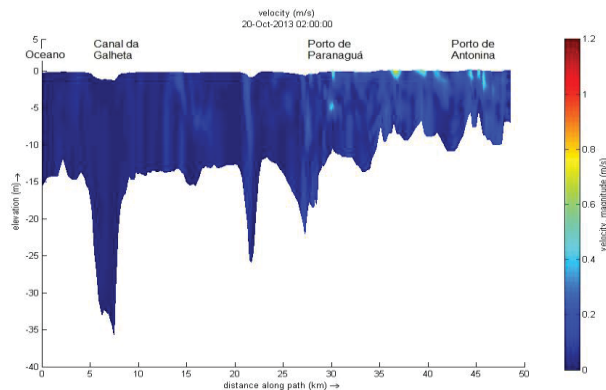


Ilustração 12 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

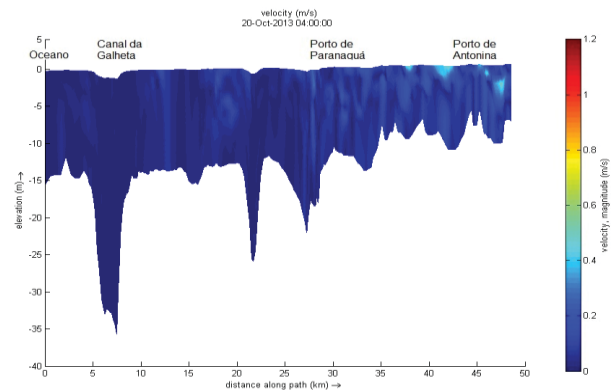


Ilustração 13 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

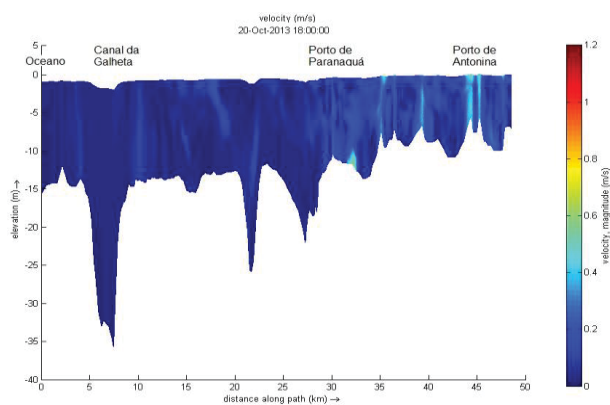


Ilustração 14 – Diferença na magnitude da velocidade horizontal às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

Na avaliação em perfil o período de enchente do estuário, dentre os três horários analisados, foi o que teve maior interferência da dragagem. Na camada superficial, entre os Portos de Paranaguá e Antonina a velocidade foi reduzida em até 0,15 m/s e só na superfície.

Salinidade

A Ilustração 15 apresenta a variação entre o cenário base e dragado, avaliando no ponto “Canal 5 – porto” a alteração na salinidade na superfície e no fundo, em todo o período válido simulado.

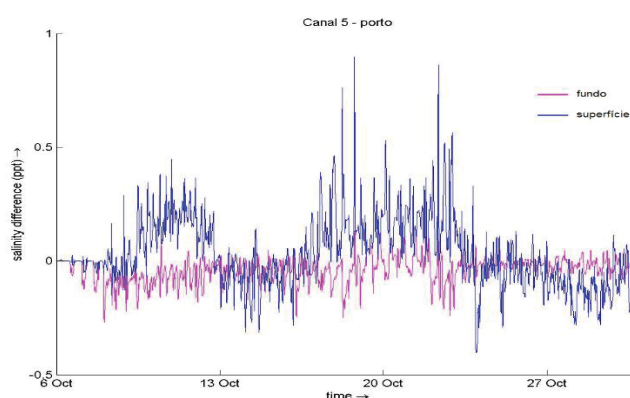


Ilustração 15 – Diferença de salinidade no ponto de observação “Canal-5 – porto” – cenário base – cenário dragado.

Em geral a salinidade na superfície é reduzida nos períodos de sizígia, mas com alterações entre 0,1 e 0,3 psu, em poucas ocasiões esses valores atingem 0,5 psu. Nas marés de quadratura, a salinidade na superfície em geral é aumentada, mas em menores proporções, ficando entre 0,2 e 0,3 psu de variação da salinidade.

Nesse ponto o leito apresenta aumento da salinidade na maior parte do período, contudo não ultrapassa 0,25 psu de diferença. A Ilustração 16 expressa as estratificações dos dois cenários e a diferença entre eles.

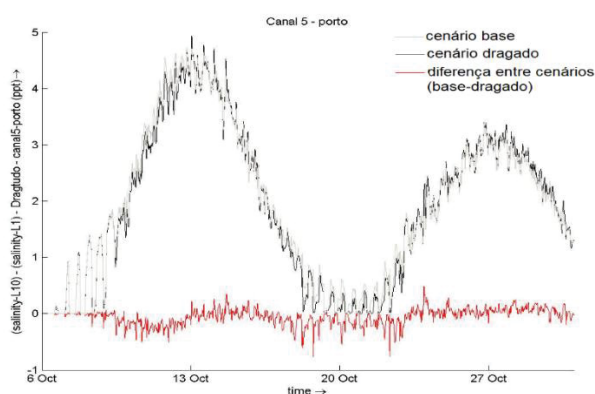


Ilustração 16 – Estratificação nos cenários base e dragado e respectiva diferença entre eles.

A estratificação na maré de sizígia é menor para ambos os cenários, os quais têm comportamentos semelhantes neste fenômeno. A diferença de estratificação salina entre eles oscila no eixo zero. No período referente à maré de sizígia a estratificação é levemente mais intensa, apresentando variações entre superfície e fundo por volta de 0,25 psu maiores no cenário dragado. Na maré de quadratura o gráfico apresenta uma leve queda na estratificação, representado pelos valores positivos da linha vermelha.

Nos tempos definidos para as avaliações foram gerados gráficos espaciais de diferença de salinidade para superfície e fundo (Ilustração 17 à Ilustração 22)

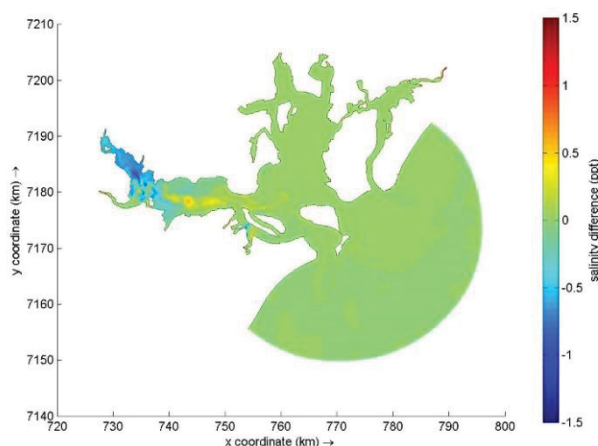


Ilustração 17 – Diferença na salinidade na superfície às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

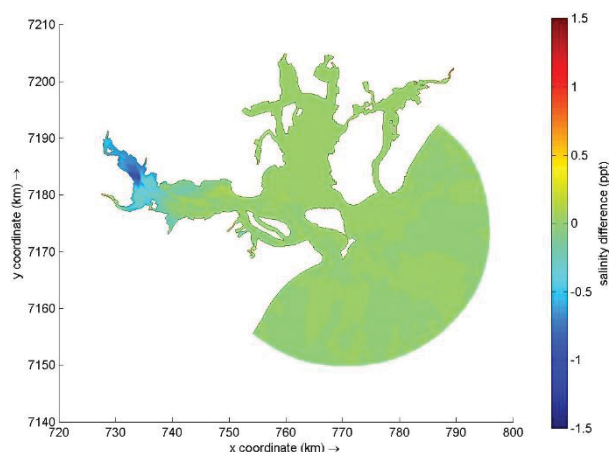


Ilustração 18 – Diferença na salinidade no fundo às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

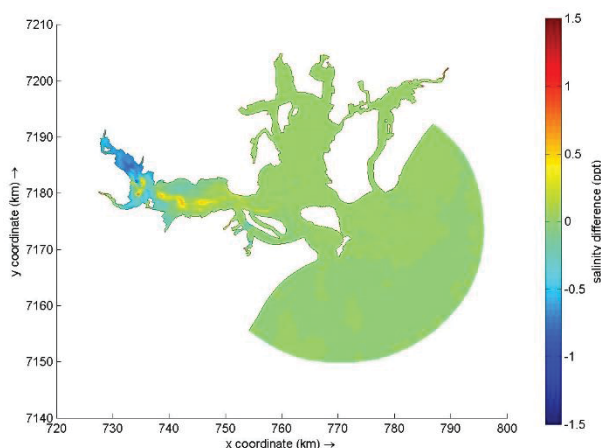


Ilustração 19 – Diferença na salinidade na superfície às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

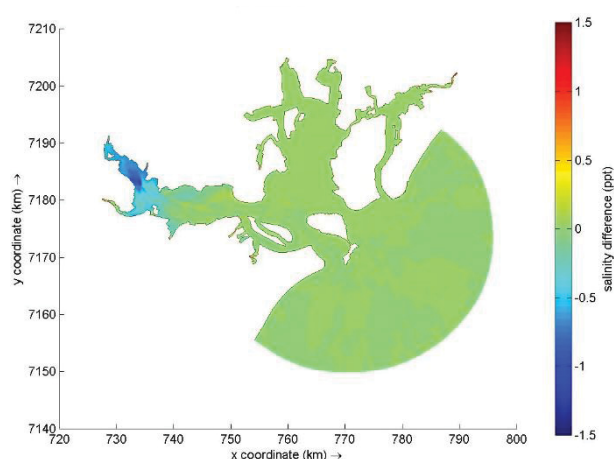


Ilustração 20 – Diferença na salinidade no fundo às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

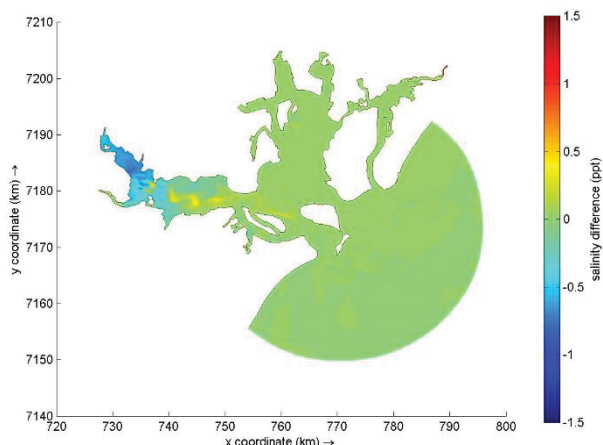


Ilustração 21 – Diferença na salinidade na superfície às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

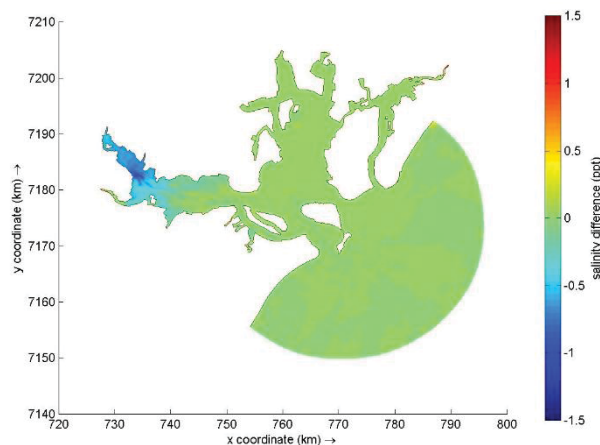


Ilustração 22 – Diferença na salinidade no fundo às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

As variações de salinidade são mais perceptíveis a partir do Porto de Paranaguá, sendo intensificadas na região de Antonina. Nessa área a salinidade é aumentada em cerca de 0,7 psu na superfície e no fundo. Nas proximidades do Porto de Antonina a variação é um pouco maior, em torno de 1,0 psu.

Na camada superficial em todos os horários observados é possível identificar a redução da salinidade no canal portuário no trecho entre Paranaguá e Antonina, com valores em torno de 0,3 psu.

As alterações do regime de salinidade quanto ao perfil da seção adotada são representadas nos três tempos escolhidos (2:00, 4:00 e 18:00 do dia 20/10/2013), na Ilustração 23, Ilustração 24 e Ilustração 25.

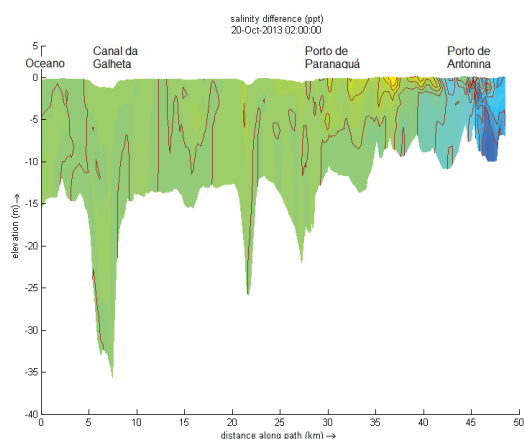


Ilustração 23 – Diferença na salinidade às 2:00 (cenário base – cenário dragado).

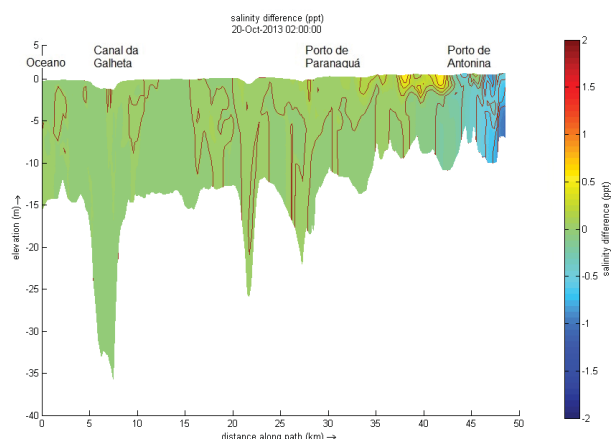


Ilustração 24 – Diferença na salinidade às 4:00 (cenário base – cenário dragado).

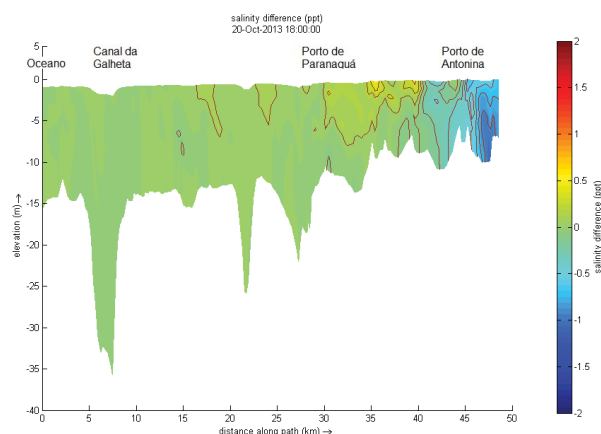


Ilustração 25 – Diferença na salinidade às 18:00 (cenário base – cenário dragado).

As análises feitas da seção longitudinal ratificam às dos gráficos espaciais, na redução da salinidade superficial no trecho entre Antonina e Paranaquá. Firma-se também o aumento da salinidade a partir do Porto de Antonina, se intensificando ao norte, com expressividade singelamente maior nas camadas inferiores.

Adotando profundidades mínimas de 12,5 m até o Porto de Paranaquá e de 9,5 m até o Porto de Antonina e os efeitos da dragagem foram quantificados. A variação da velocidade média é singelamente identificada no decorrer do canal, reduzidas em aproximadamente 0,02 m/s. Próximo ao Porto de Antonina essa variação é mais expressiva, chegando a 0,1 m/s. Na avaliação em seção percebe-se que as correntes superficiais possuem maiores valores, alcançando redução de 0,15 m/s também próximo ao Porto de Antonina, no horário de enchente.

Quanto à salinidade avaliou-se também a variação da estratificação. Ambos os cenários apresentaram comportamentos semelhantes, com variação de salinidade entre superfície e fundo menor nos dias de maré de sizígia. Nesse período a o cenário dragado apresenta estratificação em torno de 0,25 psu maior do que no cenário base. As variações de salinidade na área modelada são mais perceptíveis a partir do Porto de Paranaquá, sendo intensificadas na região de Antonina. Onde a salinidade é aumentada em cerca de 0,7 psu na superfície e no fundo. Nas proximidades da ponta do Félix a variação é ainda maior, em torno de 1,0 psu no fundo do estuário. Na seção longitudinal o aumento da salinidade nas camadas inferiores, a partir do Porto de Antonina.