

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
CENTRO DE ESTUDOS DO MAR**

**GLAUCO MATHEUS LOPES**

**APLICAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO  
HIDRODINÂMICO PARA AS BAÍAS DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA-PR**

**PONTAL DO PARANÁ  
2010**

**GLAUCO MATHEUS LOPES**

**APLICAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO  
HIDRODINÂMICO PARA AS BAÍAS DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA-PR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciência da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Profº. Dr. Eduardo Marone.

**PONTAL DO PARANÁ  
2010**

CATALOGAÇÃO NA FONTE:  
UFPR / SIBI - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar

L864a      Lopes, Glauco Matheus  
            Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as baías de Paranaguá e  
            Antonina - PR. / Glauco Matheus Lopes. – Pontal do Paraná, 2012.  
            116 f.; 29 cm.

Orientador: Dr. Eduardo Marone.

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

1. Hidrodinâmica. 2. Estuários - Paranaguá (PR). 3. Estuários - Antonina (PR).  
I.Título. II. Eduardo Marone. III. Universidade Federal do Paraná.

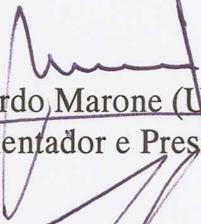
CDD 627.124

## TERMO DE APROVAÇÃO

Glauco Matheus Lopes

*“Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as baías de  
Paranaguá e Antonina, PR”.*

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de  
Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos, da Universidade Federal do  
Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Dr. Eduardo Marone (UFPR/CEM)  
Orientador e Presidente



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



Dr. Ricardo de Camargo (USP)  
Membro Examinador

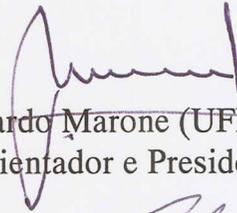
Pontal do Paraná, 31 de março de 2010.

*“Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as baías de  
Paranaguá e Antonina, PR”*

POR

Glauco Matheus Lopes

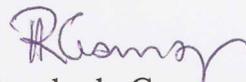
Dissertação nº 58 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no  
Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da  
Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos  
professores:



Dr. Eduardo Marone (UFPR/CEM)  
Orientador e Presidente



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



Dr. Ricardo de Camargo (USP)  
Membro Examinador

Pontal do Paraná, 31 de março de 2010.

***Dedico este trabalho à Marlene Aligotti***

*“Nós somos do oceano, somos pessoas do mar  
que irão voltar para ele mais cedo ou mais tarde”*

Solomon Aikau III

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me guiar pelos caminhos certos dessa vida e por ser a base de tudo que eu acredito hoje em dia.

Ao meu orientador, Eduardo Marone, pela confiança desde o primeiro dia, pelos ensinamentos, por toda ajuda, pelo carinho e principalmente por ter confiado este trabalho a mim, de uma forma ou de outra, fez com que eu aprendesse muito nesse período.

Agradeço a toda minha família (minha irmão, minha vó, meus padrinhos, primos) que sempre e incondicionalmente me apoiou em todas minhas decisões. Devo tudo isso aos meus pais, com quem aprendi que mesmo em qualquer dificuldade, a vontade e perseverança fazem de qualquer um no mínimo um vencedor. Vocês são meus exemplos e meu porto seguro, amo vocês.

À Taiana pelo carinho, pela amizade, pelo amor compartilhado. Muito obrigado por estar presente nesta fase da minha vida, dividindo conversas, discussões filosóficas, explicações científicas malucas (os fractais!!), risadas, carinhos. Muito obrigado por mesmo de longe me agüentar, me entender e me acalmar nos momentos de desespero. Você foi essencial no andamento deste trabalho e no aprendizado da vida.

Ao Rodrigo, meu irmão, parceiro de tantas coisas. Valeu pelas conversas, pelos debates, pelas suas teorias malucas em que me obrigava a escolher entre uma coisa ou outra (e se....!!!!rsrs), pelas roubadas, pelas bebedeiras fortes onde nem conseguíamos entender o que um falava pro outro mas mesmo assim ficávamos horas conversando..., pelo futebol, enfim pela AMIZADE... Sem dúvida você é um parceiro pro surf (menos de manha, é claro...) e pra vida. Bom, só tenho que dizer que estamos juntos BROTHA!!

Ao casal, que não conseguiria separá-los nem no parágrafo, Magrão e Lizi. Muito obrigado por serem essas pessoas tão boas comigo, e por serem companheiros em todas as horas. Lizi, valeu pelos cafés da tarde regado a muita comida e muito bate papo; pela rações trazidas de Curitiba, pelos pães da sua mãe, e principalmente pelos conselho e pela amizade. Magrão, valeu pela parceria no laboratório, nas coletas, no futebol, nas jantas, em Curitiba..Valeu pelas discussões sobre todos os temas imagináveis, mas principalmente de futebol né...(eu vi o Coxa cair!!!); as ajudas no laboratório sempre ouvindo minhas explicações malucas e sempre disposto a ajudar a terminar logo minha dissertação...Valeu pela amizade e parceria!!

As minhas parceiras Fernanda e Noele (Nossa governanta!!) pela amizade de muito tempo, pelas muitas risadas, tardes à toa, festas, praias...Vocês sempre fazem a diferença, estaremos sempre juntos!

Aos meus bons amigos, que sempre estão ai nas melhores (festas) e piores (ressacas) horas (Kalina, Tice, Vader, Zé (pescador), Biriguí, Fabian, Lyly, Guigo, enfim...

A turma da janta, que cada semana era uma surpresa (Andressa, Tati, Marília, Hugo, Mari, Dininha, Thais,) pessoas que aprendi muitas coisas como: imitar um dinossauro, fazer churrasco de batata, dormir com dois ventiladores, e que sabonete brilha na luz negra.

As “meninas dos botos” (Cami, Glaucia, Flavia, Liana, Leticia) por me receberem no primeiro dia em Pontal, pela força total ao longo desses dois anos e pelas experiências com botos vivos, tartarugas gigantes, botos mortos. À minha “hermanita” Cami, por sempre olhar por mim e me apoiar, por tentar me ensinar espanhol, salsa...pelas conversas, risadas, broncas, e maluquices...tipo subir na torre...!! “Não existe fronteiras de língua...” Te quero!

Ao prof. Maurício Noernberg pela amizade, pelos ensinamentos no laboratório, pelos conselhos, por aceitar participar desde a primeira banca e pelas partidas de futebol.

Ao Alex Falkenberg pela ajuda incondicional e paciência desde o primeiro dia. Muito obrigado pelos conselhos, pelas ajudas com o Delft e com a modelagem, parte do meu conhecimento de modelagem e principalmente do Delft devo a você.

Ao professor Ricardo de Camargo do Instituto de Astronomia e Geofísica (IAG- USP) por aceitar o convite para banca em cima da hora, e ainda assim contribui muito com as correções e com conselhos, obrigado pela força Ricardo!

A todos do Grupo de Física Marinha que de alguma forma me ajudaram (Joaquim, Rangel, Clécio, Thais, Raíssa, Marceleza, Vader, Lari, Bruna, Carol (valeu pela ajuda com as imagens) e todos mais.

Ao prof, Marcelo Lamour pelas conversas e dúvidas esclarecidas sobre as batimetrias e processos de dragagens, além das discussões futebolísticas.

Ao Taoan Franklin, por me receber e me alojar em Salvador, e pela amizade criada durante um mês de trabalho e surf! Às dicas de modelagem, que fizeram a diferença na reta final e pelos conselhos. Agradeço também o pessoal do GOAT (Grupo de Oceanografia do Atlântico Tropical) pela recepção, e em especial ao Prof.Dr. Mauro Cirano, por me receber.

Ao projeto de cooperação entre os governos do Brasil e Alemanha, DESPORT. Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos durante um período deste trabalho.

A SUDERHSA pela disponibilidade dos dados de vazão dos rios.

Agradeço a Pontal do Sul, essa cidade que encanta e assusta, mas que tem uma atmosfera diferente de qualquer outro lugar, e que só vivendo aqui para saber.

Enfim, a todos que de alguma forma foram importantes nesse período, e que fizeram deste período em Pontal do Sul, uma fase de aprendizado e crescimento.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Os modelos numéricos são ferramentas muito utilizadas hoje em dia para o entendimento da hidrodinâmica estuarina. Eles permitem otimizar custos de monitoramento e expandir o conhecimento sobre a área de estudo através de simulações computacionais. O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) se localiza na porção centro-norte do litoral do Paraná e é composto por dois corpos d'água conectados por diversos canais de maré, sendo que o eixo Leste-Oeste compreende as baías de Paranaguá e Antonina, área de estudo deste trabalho. O objetivo desse estudo foi aplicar, calibrar e validar o modelo hidrodinâmico Delft3D para as duas baías em questão. Para tanto, foram realizadas simulações para testar a influência de parâmetros físicos e numéricos no modelo e analisar as possíveis discrepâncias entre os dados medidos e simulados. A calibração do modelo foi realizada com dados do projeto DESPORT referentes à campanha de Fevereiro/2008 e sua validação com dados de Setembro/2007. A resolução da grade computacional foi refinada baseando-se na grade originalmente criada para o CEP por Herrling (2003). Os resultados mostraram forte influência das componentes não-lineares e de pequeno fundo da maré dentro do estuário, consequência das interações de fenômenos advectivos e de atrito. O parâmetro de rugosidade de fundo (Chezy) foi testado com diferentes valores, e o que representou melhor as condições reais foi o coeficiente de  $65 \text{ m}^{0.5}/\text{s}^{-1}$ , apesar de ficar evidente a necessidade de um mapa de valor de coeficiente variável. A análise dos mapas de intensidade de corrente apontou um efeito de barreira hidráulica nas regiões de alargamento da baía durante as máximas velocidades de correntes. Nesses períodos as velocidades do canal principal impedem a renovação de água e Material Particulado em Suspensão nessas regiões mais largas, situação que foi evidenciada em frente ao Porto de Paranaguá. Já nos períodos de inversão de marés, essa região apresentou formações de vórtices devido às oscilações das componentes de maré, que interagem entre si e com a irregularidade da morfologia do fundo. O modelo conseguiu representar alguns dos efeitos das componentes não-lineares na dinâmica do CEP, porém algumas interações são mais difíceis de serem modeladas, principalmente durante eventos de maré baixa ou quadratura, quando esses efeitos são mais pronunciados. Nessas situações o modelo teria que ser mais bem ajustado para esse tipo de comportamento não-linear.

## ABSTRACT

Numerical models are very useful tools for estuarine hydrodynamics studies nowadays, since they optimize monitoring costs and expand the knowledge upon the studied area through computational simulations. The Paranaguá Estuarine Complex (CEP) is located at the central-north coast of Paraná State, Brazil and consists of two main water bodies interconnected by tidal channels. The east-west axis includes Paranaguá and Antonina Bays, the study area of this work. The main objective of this work was to apply, calibrate and validate the hydrodynamic model Delft3D for the two bays cited above. Therefore, simulations had been done to test the influence of physical and numerical parameters in the model and also to analyze the possible differences between simulated and measured data. The calibration of the model was done using data from the project DESPORT, sample campaign of February/2008 and its validation used data from September/2007. The grid resolution was nested based on the original grid created for the CEP by Herrling (2003). The results showed a strong influence of non-linear components and small bottom tide components inside the estuary, which result of advective and friction phenomena interactions. Bottom roughness (Chezy) was tested with different values and  $65 \text{ m}^{0.5}/\text{s}^{-1}$  coefficient was the one that better represented the real conditions. However, it was evident the necessity of a space variable coefficient map. The currents intensity maps analysis showed a hydraulic barrier effect at the enlargement regions of the bay during the maximal currents velocities, when the main channel velocities prevent water and Suspended Particulate Material renovation at those enlarged regions. This fact was evident in front of Paranaguá Harbor. However, during the periods of tide inversion this region presented vortices formation due to tide components oscillations that interact among each other and with the irregularities of bottom morphology. The model represented quite well some of the non-linear components effects of the CEP dynamics, mostly during low water and neap tide events, when those effects are more pronounced. On these situations the model should be more adjusted for this kind of non-linear behavior.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ESTUARINA SEGUNDO (PRITCHARD, 1952). DE CIMA PARA BAIXO: (A) ALTAMENTE ESTRATIFICADO (CUNHA SALINA), (B) PARCIALMENTE MISTURADO E (C) BEM MISTURADO (FRANKLIN, 2009). -----	5
FIGURA 2: COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP). -----	12
FIGURA 3: MAPA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO UMA VISÃO GERAL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP).-----	16
FIGURA 4: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. -----	18
FIGURA 5: ÁREA DE DRENAGEM DAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ (LINHA GROSSA), ATÉ A REGIÃO DA CIDADE DE PARANAGUÁ (SEÇÃO A). DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS DOS RIOS: (1) CEDRO, (2) FAISQUEIRA, (3) CUIÚVA, (4) CACHOEIRA, (5) VENDA, (6) CACATU, (7) MEIO, (8) NUNES, (9) XAXIM, (10) CURITIBAÍBA, (11) MOURA, (12) SÃO JOÃOZINHO, (13) SAPETANDUVA, (14) NHUNDIAQUARA, (15) MARUMBI, (16) PINTO, (17) PASSA SETE, (18) SAGRADO, (19) JACAREÍ E (20) PIEDADE, (MANTOVANELLI, 1999). -----	20
FIGURA 6: VARIAÇÃO DOS NÍVEIS MÉDIOS EM DUAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÕES DURANTE O PERÍODO DE FEVEREIRO DE 2008.-----	26
FIGURA 7: DADOS DE INTENSIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTOS DE FEVEREIRO DE 2008 DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO CEM. -----	38
FIGURA 8: LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS RIOS QUE DESÁGUAM NA BAÍA DE ANTONINA, UTILIZADOS COMO DADOS DE ENTRADA PARA AS SIMULAÇÕES. -----	39
FIGURA 9: GRADE COMPUTACIONAL COM CONTORNO ABERTO EM FRENTE AO PORTO DE PARANAGUÁ. -----	41
FIGURA 10: VARIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO EM DUAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÕES DURANTE O PERÍODO DE FEVEREIRO DE 2008.-----	42
FIGURA 11: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO UTILIZADOS PARA MEDIÇÕES DOS NÍVEIS E DOS TRANSECTOS COM ADP NAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ. -----	43
FIGURA 12: MAPA BATIMÉTRICO UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES NAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. -----	44

FIGURA 13: COMPARAÇÃO ENTRE A GRADE ORIGINAL (HERRLING, 2003) E A GRADE REFINADA PARA ANTONINA E PARANAGUÁ. ----- 46

FIGURA 14: COMPARAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA DA CONDIÇÃO DE CONTORNO COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL. ----- 52

FIGURA 15: SÉRIES DE NÍVEL D'ÁGUA E NÍVEL RESIDUAL NA CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O PERÍODO ESPECÍFICO DE 13/02/2008 A 21/02/2008. ----- 53

FIGURA 16: RESOLUÇÃO DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. O TAMANHO DAS CÉLULAS VARIOU ENTRE 34 M E 180 M. ----- 56

FIGURA 17: ORTOGONALIDADE DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. OS VALORES FICARAM DENTRO DO INTERVALO RECOMENDADO ENTRE 0,02 E 0,04. ----- 56

FIGURA 18: RESOLUÇÃO ESPACIAL NOS EIXOS (M, X) E (N, Y) DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. OS VALORES FICARAM DENTRO DO VALOR MÁXIMO QUE É DE 1,2 NAS ÁREAS DE MAIOR INTERESSE E 1,4 NAS ÁREAS MAIS AFASTADAS. ----- 57

FIGURA 19: COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA MEDIDOS NA PONTA DO FÉLIX E OS DIFERENTES VALORES DE COEFICIENTES DE CHEZY TESTADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE. ----- 58

FIGURA 20: NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA PONTA DO FÉLIX. ----- 58

FIGURA 21: PONTO DE MONITORAMENTO DAS CORRENTES E TRANSECTO MEDIDO COM ADP NA REGIÃO DA FRENTE DO PORTO DE PARANAGUÁ. ----- 60

FIGURA 22: VELOCIDADE DAS CORRENTES GERADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ EM MARÉ DE QUADRATURA (13 E 14 /02/2008). ----- 61

FIGURA 23: VELOCIDADE DAS CORRENTES GERADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ EM MARÉ DE SIZÍGIA (20 E 21 /02/2008). ----- 61

FIGURA 24: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS SIMULADOS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO

PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 63

FIGURA 25: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS SIMULADOS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 64

FIGURA 26: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 65

FIGURA 27: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 66

FIGURA 28: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 67

FIGURA 29: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 68

FIGURA 30: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS PARA O CENÁRIO DE CHEZY  $65 \text{ M}^{0,5}/\text{S}^{-1}$  COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 69

FIGURA 31: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS PARA O CENÁRIO DE CHEZY  $65 \text{ M}^{0,5}/\text{S}^{-1}$  COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 70

FIGURA 32: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS TRÊS VALORES DE CHEZY, NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 71

FIGURA 33: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS TRÊS VALORES DE

CHEZY, NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 72

FIGURA 34: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS VALORES DE CHEZY  $65M^{0,5}/S^{-1}$ , NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.----- 74

FIGURA 35: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS VALORES DE CHEZY  $65M^{0,5}/S^{-1}$ , NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS. ----- 74

FIGURA 36: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE QUADRATURA (13/02/2008- 15H00). ----- 77

FIGURA 37: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE QUADRATURA (13/02/2008- 19:00). ----- 78

FIGURA 38: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (21/02/2008- 06:00). ----- 79

FIGURA 39: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (21/02/2008- 02H30). ----- 80

FIGURA 40: NÍVEL MÉDIO DA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ, UTILIZADO COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO NA VALIDAÇÃO DO MODELO (01/09/2007 À 15/09/2007). ----- 81

FIGURA 41: DADOS DE INTENSIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTOS DE SETEMBRO DE 2007 DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO CEM UTILIZADOS NO PERÍODO DA VALIDAÇÃO. ----- 82

FIGURA 42: COMPARAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA MEDIDOS E MODELADOS DA REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL PARA O PERÍODO DE SIMULAÇÃO. 78

FIGURA 43: COMPARAÇÃO DAS CORRENTES MEDIDAS E MODELADAS DA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 16H00 À 12/09/2007- 12H00). ----- 85

FIGURA 44: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (11/09/2007- 17H30).----- 87

FIGURA 45: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (11/09/2007- 20H30).----- 87

FIGURA 46: MAPA INDICANDO A LOCALIZAÇÃO EXATA DAS DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS CRIADAS PARA MONITORAMENTO DAS CORRENTES.----- 89

FIGURA 47: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 17H30 À 12/09/2007- 19H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE VAZANTE PARA ENCHENTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.----- 90

FIGURA 48: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 47. ----- 91

FIGURA 49: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (12/09/2007- 01H30 À 12/09/2007- 03H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE ENCHENTE PARA VAZANTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.----- 92

FIGURA 50: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 49. ----- 93

FIGURA 51: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (02/09/2007- 22H00 À 03/09/2007- 01H00) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE VAZANTE PARA ENCHENTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS. ----- 94

FIGURA 52: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 51. ----- 95

FIGURA 53: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (03/09/2007- 03H00 À 03/09/2007- 06H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE ENCHENTE PARA VAZANTE NA REGIÃO DO

PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S)  
CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS. ----- 96

FIGURA 54: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES  
TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ  
CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 53. ----- 96

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DE MARÉ PARA A BAÍA DE PARANAGUÁ E ANTONINA. CONSIDERA-SE A GALHETA COMO ZERO DE ORIGEM (MARONE et al. 1997).-----	255
TABELA 2: DADOS DE VAZÕES DIÁRIAS ( $M^3/S$ ) DOS RIOS UTILIZADOS NO MODELO-----	40
TABELA 3: PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS UTILIZADOS NO MODELO HIDRODINÂMICO-----	49
TABELA 4: RESULTADOS ESTATÍSTICOS ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO DURANTE O PERÍODO DE (13/02/2008-12H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX. VALORES EM METROS.-----	544
TABELA 5: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS SIMULADOS PARA O NÍVEL D'ÁGUA SEM APORTE DOS RIOS E COM DIFERENTES VALORES DE CHEZY DURANTE O PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ E DA PONTA DO FÉLIX.-----	688
TABELA 6: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS DE VELOCIDADE DE CORRENTES SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS E COM DIFERENTES VALORES DE CHEZY DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00) E SIZÍGIA (20/02/2008- 11H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ.-----	73
TABELA 7: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS DE VELOCIDADE DE CORRENTES SIMULADOS COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA VALORES DE CHEZY $65M^{0,5}/S^{-1}$ DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00) E SIZÍGIA (20/02/2008- 11H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ.-----	755
TABELA 8: PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DO MODELO.-----	81
TABELA 9: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO PARA NÍVEIS D'ÁGUA DURANTE O PERÍODO DE (01/09/2007- À 15/09/2007) E PARA OS PERÍODOS DE QUADRATURA E SIZÍGIA, PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX.-----	8484

TABELA 10: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO PARA VELOCIDADE DAS CORRENTES DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 16H00 À 12/09/2007- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ.-----86

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> -----	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> -----	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> -----	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> -----	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> -----	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> -----	<b>1</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> -----	<b>3</b>
<b>2.1 CIRCULAÇÃO ESTUARINA</b> -----	<b>3</b>
<b>2.2 A MARÉ NO AMBIENTE ESTUARINO</b> -----	<b>6</b>
<b>2.3 ONDAS PROGRESSIVAS E ESTACIONÁRIAS</b> -----	<b>7</b>
<b>2.4 COMPONENTES NÃO-LINEARES</b> -----	<b>9</b>
<b>2.5 CORRENTES DE MARÉ</b> -----	<b>10</b>
<b>2.6 MODELAGEM NUMÉRICA EM OCEANOGRAFIA COSTEIRA</b> -----	<b>10</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> -----	<b>12</b>
<b>3.1 OBJETIVOS</b> -----	<b>14</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO</b> -----	<b>16</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA</b> -----	<b>16</b>
<b>4.2 APORTE FLUVIAL</b> -----	<b>18</b>
<b>4.3 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E SEDIMENTOS DE FUNDO</b> -----	<b>20</b>
<b>4.4 CLASSIFICAÇÃO</b> -----	<b>22</b>
<b>4.5 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS</b> -----	<b>24</b>
<b>5 DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO</b> -----	<b>28</b>
<b>5.1 O MODELO DELFT 3D</b> -----	<b>29</b>
<b>5.2 O MÓDULO DELFT 3D-FLOW</b> -----	<b>29</b>
<b>5.3 FORMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO DELFT3D-FLOW</b> -----	<b>31</b>
<b>6 MATERIAL E MÉTODOS</b> -----	<b>37</b>
<b>6.1 DADOS DISPONÍVEIS NA BAIJA DE PARANAGUÁ E ANTONINA</b> -----	<b>37</b>
6.1.1 DADOS DE VENTOS -----	37
6.1.2 DADOS DE VAZÃO DOS RIOS -----	38
6.1.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTO -----	40
6.1.4 DADOS DE MARÉ E CORRENTES -----	42
6.1.5 BATIMETRIA -----	43
6.1.6 GRADE NUMÉRICA -----	44
<b>6.2 ALGORÍTMO “WET AND DRY”</b> -----	<b>46</b>

<b>6.3 PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS</b> .....	<b>47</b>
<b>7 RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
<b>7.1 CONCEPÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>50</b>
<b>7.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO</b> .....	<b>50</b>
7.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	51
7.2.2 PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA .....	55
7.2.3 RUGOSIDADE DE FUNDO .....	57
7.2.3.1 COMPARAÇÃO DE NÍVEL .....	58
7.2.3.2 COMPARAÇÃO DE CORRENTES .....	59
7.2.4 EFEITOS DO VENTO .....	62
7.2.5 APORTE FLUVIAL .....	67
7.2.6 CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES .....	75
<b>7.3 VALIDAÇÃO</b> .....	<b>80</b>
<b>8 DISCUSSÃO</b> .....	<b>98</b>
<b>8.1 A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS NA RESPOSTA DO     MODELO</b> .....	<b>98</b>
8.1.1 RESOLUÇÃO DA GRADE E BATIMETRIA .....	98
8.1.2 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE FUNDO (CHEZY) .....	100
8.1.3 APORTE DOS RIOS .....	102
8.1.4 COMPONENTES NÃO-LINEARES DA MARÉ .....	104
<b>9 CONCLUSÕES</b> .....	<b>108</b>
<b>9.1 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>109</b>
<b>10 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sempre, as regiões costeiras têm sido bastante atraentes à ocupação humana devido à riqueza e diversidade de seus recursos naturais, o que só tem se acentuado com o passar do tempo. Em consequência disso, grandes centros urbanos foram se desenvolvendo em áreas litorâneas. Três das cinco maiores cidades brasileiras são litorâneas, e segundo o IBGE (2008), mais da metade da população do nosso país vive a menos de 200 km da costa. Além disso, os portos são fontes importantes de renda, e a principal forma de exportação de produtos nacionais.

Nessa região encontram-se as baías e estuários, ambientes quase sempre abrigados, que apresentam facilidades para instalações portuárias, navais e comerciais. Esses ambientes são propícios ao desenvolvimento de grandes áreas urbanas, devido também à abundante disponibilidade de recursos naturais.

O crescimento, muitas vezes desordenado destes centros urbanos, pode causar efeitos deletérios ao meio ambiente associados a desmatamento de áreas de manguezais, à pesca predatória, ao despejo de resíduos domésticos e industriais e às dragagens associadas às atividades portuárias. Os efeitos destas atividades podem ser observados na poluição das águas e sedimentos, redução da produtividade pesqueira, limitações nas áreas de navegação e alterações na morfologia natural e na hidrodinâmica local (JIANG *et al.*, 2001).

Os estuários são ambientes extremamente delicados devido às suas complexas interações entre os parâmetros físicos, químicos, biológicos e geológicos, e sofrem fortes consequências das atividades antrópicas. Desta forma, estudos sobre a hidrodinâmica estuarina são de fundamental importância para o entendimento da circulação e qualidade das águas, e da distribuição e transporte de materiais no sistema (matéria orgânica particulada, sedimentos, nutrientes, clorofila) (KJERVE, 1990).

A hidrodinâmica estuarina está vinculada principalmente a fatores meteorológicos (ventos, chuvas e descarga de água doce), oceanográficos

(ondas e marés) e geológicos (tipo de sedimento) (RIBAS, 2004). Aos efeitos destes fatores somam-se as influências exercidas pela geometria e batimetria do corpo estuarino e pela circulação da região costeira adjacente (MIRANDA, 1990).

Uma das ferramentas utilizadas para o entendimento da hidrodinâmica de um corpo d'água é a modelagem numérica. Os modelos numéricos, devido à complexidade matemática, exigem um esforço para o cômputo de seus resultados e só podem ser utilizados nos dias de hoje graças ao desenvolvimento tecnológico dos computadores.

Modelos calibrados e validados são ferramentas indispensáveis ao gerenciamento de sistemas ambientais, permitindo otimizar os custos de medições e monitoramento, além de possibilitar a expansão do conhecimento para grandes áreas, onde não foram realizadas coletas de dados (RIBAS, 2004). Assim, a modelagem tem se tornado, atualmente, uma das ferramentas mais importantes para melhor entender os processos hidrodinâmicos, ajudando na interpretação de medições realizadas e servindo como base para previsão de cenários futuros através da modelagem preditiva.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CIRCULAÇÃO ESTUARINA

Um estuário pode ser definido de diversas maneiras, dependendo do ponto de vista empregado no trabalho e até mesmo dos autores. Alguns conceitos de estuários são conflitantes quanto a sua definição física, geológica, biológica, e até mesmo política. Levando em consideração a natureza deste trabalho, o conceito de estuário adotado aqui é definido por Pritchard (1955) e adaptado por Dyer (1973).

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.*

A diferença de densidade das águas pode-se apresentar como gradientes horizontais e/ou verticais, sendo neste último caso, quando extremo, que se produz a estratificação das águas. Também a diferença de densidade dessas águas, principalmente quando é governada pelo movimento das marés dentro do estuário e a morfologia local, gera gradientes de pressão dos tipos barotrópico e baroclínico, que irão atuar no deslocamento e mistura das massas d'água costeira e fluvial.

O gradiente de pressão barotrópico é gerado pelas variações periódicas do nível do mar associadas às marés e à descarga fluvial. A maré é a principal forçante da circulação barotrópica, e provoca oscilações principalmente semi-diurnas na costa brasileira, enquanto a descarga fluvial gera gradientes de pressão no sentido continente-mar, e é regulada principalmente pelos ciclos sazonais de pluviosidade. O gradiente de pressão baroclínico é gerado pela diferença longitudinal e/ou lateral de densidade, associada à diluição da água salgada estuário adentro (KJERVE, 1989).

Essa estratificação devida às diferenças de densidade entre a água do mar e do rio pode ser quebrada parcial ou completamente pela ação dos ventos e das marés através de processos de difusão turbulenta (KJERVE,

1990). A turbulência é um mecanismo de dissipação de energia produzida pelo cisalhamento de velocidade, gerado pela fricção das correntes de maré com o fundo e com as bordas de um corpo estuarino (DYER,1973). Neste processo, volumes iguais de água são trocados entre a camada superior e a inferior, resultando em um fluxo vertical de água nulo, havendo somente fluxo de sal e *momentum* , o que torna essa mistura essencialmente difusiva.

Outro processo de circulação é o arrasto ou intrusão (“*entrainment*”), que consiste em um processo advectivo, resultante do cisalhamento de velocidade que ocorre na haloclina (MIRANDA, 1996). Se o fluxo for intenso o suficiente para superar a estratificação por densidade, então ocorrem ondas na interface entre as duas camadas (ondas internas). Essas ondas geram uma transferência de volume e sal da camada inferior (menos turbulenta) para a superior (mais turbulenta). Desta forma, difusão e advecção são os principais mecanismos de mistura entre água doce e salgada nos corpos estuarinos (MIRANDA, 1996).

Visto os mecanismos responsáveis pela mistura entre as massas de água em um corpo estuarino, podemos desta forma classificar os estuários segundo Pritchard (1952), em três tipos de acordo com os padrões de mistura (Figura 1):

- **A – Cunha salina:** são estuários altamente estratificados, típicos de regiões de micromaré, onde ocorre o domínio da descarga fluvial. A água doce continental, por ser menos densa, tende a se manter na superfície, movendo-se sempre em direção ao oceano. Como a água de origem possui maior densidade, ela penetra no estuário pelas camadas do fundo, gerando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade e um aumento gradativo da mesma em direção ao oceano;

- **B – Parcialmente misturado:** estuários onde o volume de água no seu interior não é totalmente misturado. A força da maré e a descarga fluvial possuem forças equivalentes que irão gerar turbulência interna. Esse processo gera uma mistura entre as águas de origem continental e marinha, fazendo com que haja um aumento da salinidade de maneira gradual tanto na vertical quanto na horizontal. As diferenças entre marés de quadratura e sizígia irão

submeter esse tipo de estuários a processos cíclicos de intensificação e relaxamento da estratificação vertical de salinidade, respectivamente.

- **C – Bem misturado:** estuários típicos de ambientes rasos, onde a descarga fluvial é muito pequena, havendo apenas ou predominantemente influência da maré. Este ambiente não apresenta gradiente vertical de salinidade, ou em alguns casos é muito fraco. O gradiente longitudinal de salinidade é observado no sentido estuário abaixo, porém é menor do que em estuários parcialmente misturados.

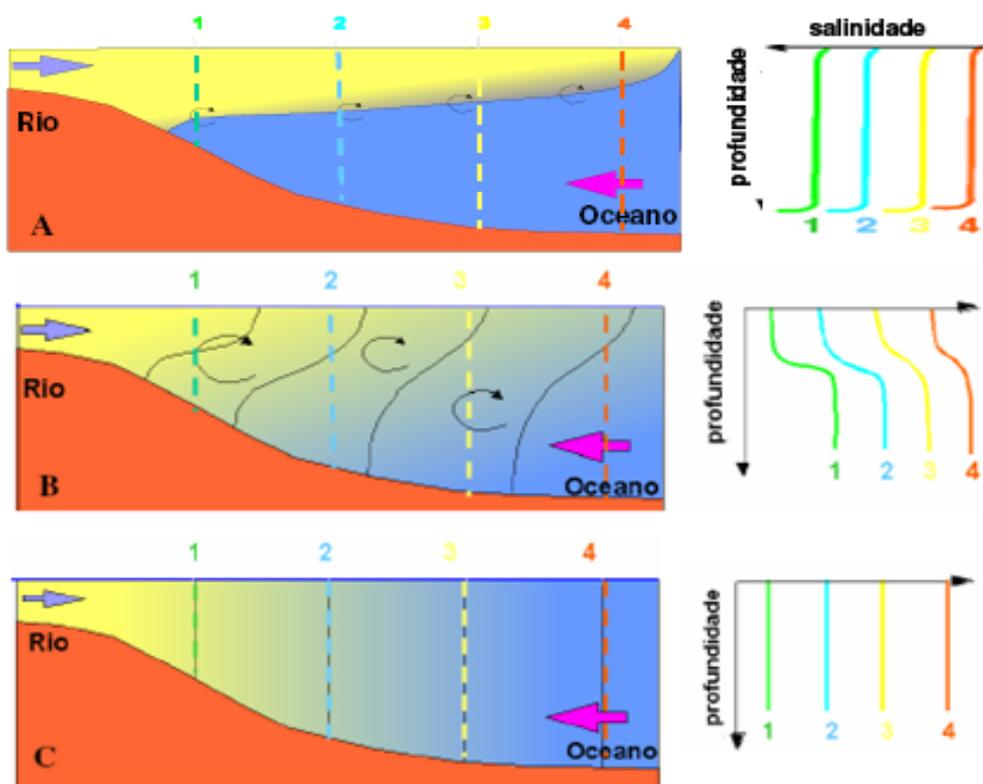


FIGURA 1: PADRÕES DE CIRCULAÇÃO ESTUARINA SEGUNDO (PRITCHARD, 1952). DE CIMA PARA BAIXO: (A) ALTAMENTE ESTRATIFICADO (CUNHA SALINA), (B) PARCIALMENTE MISTURADO E (C) BEM MISTURADO (FRANKLIN, 2009).

Essa classificação leva em consideração o grau de influência das forçantes barotrópicas e baroclínicas, e vale ressaltar que devido à dinâmica destas forçantes, podem ocorrer situações em que estes conceitos se “sobreponham” dentro de um mesmo estuário, seja no espaço ou no tempo.

## 2.2 A MARÉ NO AMBIENTE ESTUARINO

A propagação da maré em estuários envolve um processo advectivo intenso numa região de topografia muitas vezes complexas, cujas características são importantes para obter as diferenças de fase entre a propagação da onda, a corrente de maré e a variação de salinidade (MIRANDA *et al.* 2002).

Quando uma onda de maré se propaga estuário adentro, sofre distorções devido a diminuição da profundidade e do estreitamento dos canais, o que seguindo o princípio de conservação de volume, tende a elevar a amplitude da maré. Esse atrito com o fundo e com as margens controla a energia da maré, e conseqüentemente, o seu alcance continente adentro (MASSELINK & HUGHES, 2003). Após certa penetração nas águas dos rios, as mudanças devidas às oscilações das marés desaparecem ao ter sua energia consumida pelo atrito, daí a definição de *Dyer* mencionada anteriormente (Item 2.1).

A propagação de uma onda de maré em estuários pode ser representada pela equação:

$$c = \sqrt{g(h \pm \alpha)} \quad \text{Eq.1}$$

onde  $c$  é a celeridade ou velocidade da onda,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h$  é a profundidade média do canal e  $\alpha$  é a variação do nível relativo do mar ao redor do nível médio (sendo positivo para maré alta e negativo para maré baixa). Essa equação representa a redução da velocidade da onda à medida que diminuem as profundidades, fazendo com que a crista da onda se movimente mais rápido que sua base. Essa redução da velocidade gera distorções nos tempos de enchente e vazante, fenômeno conhecido como assimetria de maré (DRONKERS, 1986).

Em muitos estuários, a presença de extensas áreas intermareais provoca um espalhamento lateral da água sobre essas planícies, causando um “atraso” nos picos de preamar (DRONKERS, 1986). Durante a maré vazante, o

volume armazenado nas áreas intermareais é drenado rapidamente pelos canais de maré, gerando um intenso fluxo de vazante.

O trabalho de uma força  $F$  aplicada ao longo de um caminho  $C$  pode ser calculado de forma geral através da seguinte integral de linha:

$$W_c = \int_c F \cdot dr \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

$F$  é o vetor força;

$R$  é o vetor posição ou deslocamento;

O vetor  $F$  é maior no processo de enchente, ao ter que escoar em uma “rampa” ascendente (e contra a ação da gravidade), onde o caminho  $C$  leva a uma transformação da energia cinética em potencial. Na vazante, o fluxo acontece descendo a “rampa”, aproveitando a energia potencial acumulada, a força da maré e a aceleração da gravidade favorável. A intensidade desse efeito é relacionada à diferença entre o volume de água nos canais principais e o volume armazenado nas planícies de maré. A vegetação de mangue associada a estas planícies também acentua a distorção na onda de maré, uma vez que aumenta a resistência do escoamento (LE HIR *et al.* 2000).

### 2.3 ONDAS PROGRESSIVAS E ESTACIONÁRIAS

Dentro de um estuário, as ondas de maré podem se comportar de formas distintas dependendo das características topográficas do local e dos efeitos que estas sofrem devido ao atrito com os fundos e com as margens (DYER, 1973).

No caso de propagação em forma *progressiva*, as preamares e baixamares ocorrem em instantes diferentes, dado o tempo em que a “crista” ou a “cava” da onda leva em progredir de um local a outro dentro do estuário. Já no caso do comportamento *estacionário*, o nível da água apresenta um

comportamento mais uniforme com as preamares ou baixa-mares ocorrendo no mesmo instante em qualquer local do estuário.

Em um estuário não estratificado a onda de maré se propaga como uma onda de águas rasas (dependente da profundidade local). Esta penetra em um estuário em direção a cabeceira de forma *progressiva*, onde sua fase e amplitude apresentam uma progressão em relação ao tempo, ocasionando uma defasagem temporal da maré alta e maré baixa (LEWIS, 1943).

Se observarmos a equação da celeridade da onda, citada no item 2.2 que se aplica ao caso de águas rasas:

$$c = \sqrt{g(h \pm \alpha)}$$

Surge imediatamente que, ao diminuir a profundidade  $h$ , diminui a celeridade da crista ( $c$ ).

Por outro lado, mesmo que genericamente tem sido atribuído o nome de onda de maré à co-oscilação das variações harmônicas do nível do mar dentro do estuário, esta onda tem a particularidade de ser o resultado da combinação de várias componentes de maré com periodicidade que vão, tipicamente de 12 ciclos por dia até dezenas de anos (FRANCO, 1988).

Assim, para cada componente de maré existe um valor diferente do  $\alpha$  (variação do nível relativo do mar ao redor do nível médio), devida a cada componente de maré ter uma celeridade diferente para cada periodicidade astronômica.

A propagação de uma onda de maré não ocorre infinitamente como uma onda progressiva, uma vez que ela pode encontrar barreiras continentais e sofrer reflexão (PUGH, 1987). Se a energia da onda é forte o suficiente para que ela alcance os limites continentais da cabeceira dos estuários, ocorre então uma reflexão e esta onda reflete estuário abaixo ao encontro de outra crista subsequente. (DYER, 1973). A interação (interferência) entre duas ou mais ondas de maré (progressivas) em um ambiente onde ocorre reflexão, irá causar uma transformação na mesma, fazendo com que ela se comporte de

forma *estacionária* se uma combinação específica de fases e distâncias acontecer (FRANCO,1988).

Por outro lado, como na natureza muitos fenômenos, especialmente macroscópicos, não sofrem mudanças bruscas e sim ocorrem com zonas de transição, nos casos de mudança de propagação do tipo *progressiva* para *estacionária*, a maré costuma apresentar uma zona de transição, onde se apresenta um efeito misto.

O comportamento dessas ondas causa também interações entre as diversas componentes da onda de maré, influenciando sua amplitude, sua fase e seu período. Devido à advecção, ao atrito com o fundo e com as margens, as constituintes da maré são modificadas, e passam a sofrer também *interações não-lineares*. Essas interações ocorrem porque processos advectivos e de atrito de tipo não-lineares, começam a participar do fenômeno. Quando se encontram podem ser somadas, subtraídas ou multiplicadas (PUGH, 1987).

## **2.4 COMPONENTES NÃO-LINEARES**

Em águas rasas, particularmente no interior de estuários, as marés estão sujeitas a sofrer distorções devido à hidrodinâmica natural que de um modo geral modificam o padrão de suas componentes (FRANCO, 1981). Os efeitos causados por essas distorções podem resultar na perda de energia da maré, diferenças de amplitude e defasagem temporal nos períodos de enchente, vazante e estofa. Estas distorções geram interações não-lineares entre as componentes, devido à troca de energia entre escalas dinâmicas diferentes (MARONE, 1991).

Estas interações não-lineares entre duas componentes são capazes de transferir energia para uma terceira frequência, que muitas vezes tem seus valores de amplitude e fase desconhecidos, devido à ausência de informação sobre a influência de cada componente nesta interação. Estas interações podem ocorrer até uma quarta frequência, onde são geradas componentes chamadas de pequeno fundo. Estas interações são originadas devido a

fenômenos de atrito com a morfologia do fundo e com a lateral dos estuários, e são mais pronunciadas durante o período de eventos de maré de quadratura (MARONE, 1991).

As interações e os efeitos causados por essa não-linearidade pode ser observado através da mudança na força e na duração dos períodos de enchente e vazante e através da formação de áreas de vórtices, responsáveis por transporte de materiais em suspensão e processos de mistura em ambientes estuarinos e costeiros.

## **2.5 CORRENTES DE MARÉ**

Um dos efeitos causados pela assimetria da maré nos estuários é a corrente de maré. Estas correntes podem ter fluxos dominantes de enchente ou de vazante, dependendo do gradiente horizontal do nível de água e da morfologia da região de escoamento. Em estuários com canais de maré profundos e grandes áreas intermareais, há um predomínio de correntes de vazante mais intensas, enquanto estuários com canais rasos e pouca área intermareal tendem a gerar correntes de enchente mais intensas (DRONKERS, 1986).

Essas correntes, assim como as correntes residuais (que representam a velocidade média das correntes ao longo de um tempo, ou seja, ao longo de vários ciclos de maré), exercem um papel relevante no tempo de residência de materiais (nutrientes, sedimentos, Material Particulado em Suspensão- MPS) dentro do estuário, controlando a importação ou exportação dos mesmos no interior do corpo d'água (LE HIR *et al.* 2000).

## **2.6 MODELAGEM NUMÉRICA EM OCEANOGRAFIA COSTEIRA**

Uma ferramenta muito utilizada nos dias de hoje para o estudo da hidrodinâmica estuarina e de outros ambientes, é a modelagem numérica. A

utilização desta ferramenta em simulações hidrodinâmicas vem sendo possibilitada devido ao aumento do desenvolvimento tecnológico dos computadores, somado ao conhecimento da física e da matemática envolvidas nos processos hidrodinâmicos.

Por esse motivo, a modelagem numérica tem sido bastante empregada no monitoramento da qualidade de água, no entendimento de processos dispersivos, em planejamento de ações para acidentes com óleo, e no estudo das variações geométricas de canais de navegação portuária, baías e estuários como um todo.

O crescimento do uso da modelagem numérica em ambientes estuarinos levou a um rápido desenvolvimento em áreas de pesquisa relacionadas à (HARRIS *et al.* 2004):

- Mecânica dos fluídos e hidráulica; i.e. Modelagem de turbulência;
- Transporte de sedimento e processos de poluição; i.e. Dinâmica de sedimentos coesivos e não-coesivos;
- Aspectos ecológicos, biológicos e químicos; i.e. Traçadores ambientais como metais traço e contaminantes orgânicos;
- Modelagem de descontinuidade; i.e. Gradientes de alta densidade em saídas de emissários;
- Aquisição e interpretação de dados de campo e dados experimentais;

Contudo, é preciso ressaltar que os modelos numéricos devem ser utilizados apenas como uma ferramenta de apoio a tomada de decisões no monitoramento desses ambientes, sendo necessários outros estudos que complementem seus resultados para qualquer situação.

### 3 JUSTIFICATIVA

Os processos que regem o padrão hidrodinâmico em ambientes estuarinos têm influência direta na distribuição de sais, sedimentos, nutrientes, poluentes e microorganismos, os quais podem ser considerados como traçadores ambientais nestes ambientes. Sendo assim, a caracterização do comportamento hidrodinâmico destes sistemas, e o entendimento de forçantes como o aporte fluvial, o regime de marés e o efeito da dinâmica dos ventos, podem fornecer informações sobre os processos dominantes numa dada região de estudo.

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) abriga diversas Unidades de Conservação estaduais e federais, destacando-se a Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba (APA), a Estação Ecológica de Guaraqueçaba, o Parque Nacional do Superagui e a Estação Ecológica Ilha do Mel (NIMAD, 1994).

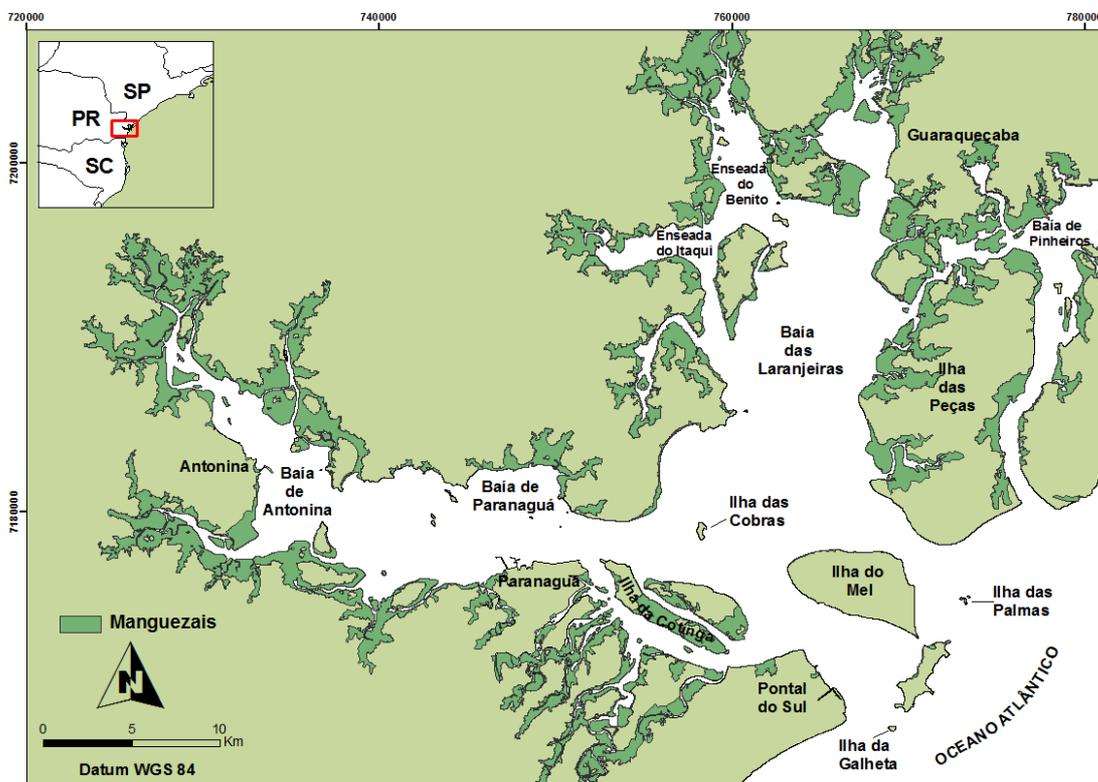


FIGURA 2: COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP).

Praticamente todo o Complexo Estuarino de Paranaguá possui uma área de manguezal muito importante que serve como habitat de criação, proteção e alimentação de diversas espécies de moluscos, crustáceos e peixes. Regiões com estas características atuam como reguladoras de ciclos químicos que influenciam diretamente na dinâmica dos fluxos de nutrientes e de material orgânico particulado na zona costeira (DAY *et al.* 1989).

Além da importância ecológica, o CEP possui um papel fundamental no desenvolvimento econômico da região, devido às atividades portuárias que nele ocorrem (Portos de Paranaguá e Antonina, sendo que o primeiro é o maior exportador de grãos da América Latina), as atividades pesqueiras (principalmente artesanal) e ao turismo (CAMARGO, 1998). Essas atividades ocasionam um intenso tráfego de navios de grande porte e de pequenas e médias embarcações (passageiros ou pesca), resultando em maiores riscos de contaminação das águas da baía por petróleo e derivados.

Outro fator importante a ser considerado, é que o constante desenvolvimento portuário da região, atrai navios de porte e calado cada vez maiores aos portos de Paranaguá e Antonina, gerando a necessidade de maiores profundidades para navegação. Com isso, os estudos sobre a dinâmica do transporte de sedimentos tornam-se extremamente relevantes para a região, uma vez que esse processo depende de diversos fatores hidrodinâmicos como a variação no regime de correntes, o fluxo de sedimentos, o tamanho dos grãos, o regime de marés, o aporte fluvial, entre outros.

Dentre os fatores que regulam a dinâmica sedimentar, um dos mais importantes e complexos é o aporte fluvial. Os sedimentos trazidos pelos rios possuem um ciclo de transporte, deposição e resuspensão que dependem do regime oceanográfico costeiro e do comportamento sazonal da descarga do rio. Estes processos são mais evidentes durante o verão, onde o potencial de erosividade é maior, mas pode ocorrer intenso aporte fluvial em qualquer época do ano que houver intensa precipitação (NOERNBERG, 2001).

Os estuários, como citado anteriormente, são ambientes extremamente dinâmicos e que sofrem influência de diversos processos complexos que

interagem entre si. Essa complexidade vem sendo estudada nos últimos anos com os olhos da ciência voltados para a pesquisa e desenvolvimento de modelos numéricos que ajudam a prever campos de fluxos, além de diversos parâmetros estuarinos e costeiros (MEUNIER *et al.*, 2006)

A grande vantagem dos modelos numéricos está no fato de considerarem a complexidade dos fenômenos físicos em um ambiente, sem haver a necessidade de um grande esforço amostral, poupando assim, tempo e gastos com coletas de campo. Além disso, essa ferramenta também permite a simulação de situações que ainda não aconteceram no ambiente.

A modelagem dos fluxos desta área de estudo serve, em um primeiro momento, como subsídio para que sistemas responsáveis por tomadas de decisões possam adotar medidas de respostas e controle mais eficazes num espaço de tempo mais curto e com um custo mais baixo.

### **3.1 OBJETIVOS**

Este estudo esteve inserido no projeto DESPORT “Desenvolvimento de Estratégias Sustentáveis para os Portos Brasileiros” resultado de um convênio entre os governos do Brasil e da Alemanha cujo um dos objetivos foi estudar o comportamento hidrodinâmico da região portuária de Paranaguá e Antonina com o uso da modelagem numérica e; entender e descrever o comportamento dos fluxos de água e materiais dentro do CEP, os quais são fortemente influenciados pelo aporte dos rios, pela entrada das águas costeiras através das forças de marés e pela ação dos ventos.

Vale ressaltar que esse projeto teve a coordenação do Grupo de Física Marinha (GFM) do Centro de Estudos do Mar (CEM) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e do CORELAB (Research and Technology Center Westcoast) da Universidade de Kiel, Alemanha.

Sendo assim, os objetivos gerais deste trabalho são:

- Aplicar, calibrar e validar um modelo numérico hidrodinâmico para as baías de Paranaguá e Antonina, utilizando como contorno aberto uma secção transversal em frente ao porto de Paranaguá;
- Avaliar, no processo de validação de resultados, as potenciais causas físicas e/ou numéricas de diferenças entre os resultados do modelo e as observações de campo que por ventura aconteçam.

Este trabalho baseia-se na hipótese de que as simulações numéricas hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos, são ferramentas importantes que auxiliam no estudo de ambientes como rios, estuários, plataforma continental, e oceano aberto, minimizando esforços relativos à amostragem e tempo de resposta dos resultados. Modelos numéricos também podem fornecer informações numa escala espacial e temporal ainda mais detalhada e aprofundada que as caracterizações estuarinas tradicionais.

Assim sendo, os objetivos específicos deste trabalho, estão diretamente relacionados aos resultados obtidos através das simulações numéricas, sendo estes:

- Verificar a resposta quanto às velocidades de fluxo e de vazão em escala de tempo de minutos/horas; e durante ciclos completos de maré de sizígia e quadratura;
- Gerar um modelo completo, devidamente calibrado e validado com dados de campo, de modo que seja possível no futuro, implementar o módulo de transporte de sedimentos;
- Disponibilizar informações quanto aos fluxos de água nesta área.



A região é composta por dois corpos de água principais, conectados por diversos canais de maré, sendo, as baías de Laranjeiras e Pinheiros (no eixo Norte-Sul) com 200km<sup>2</sup>, e as baías da Paranaguá e Antonina (no eixo Leste-Oeste) com 260km<sup>2</sup>, onde além de atividades de lazer e pesca, também há intensa atividade portuária (LANA *et al.*, 2001). A conexão com o oceano é feita através de duas desembocaduras, Norte e Sul, denominadas de acordo com a localização em relação à Ilha do Mel.

A desembocadura Norte, possui dois canais, o Norte, localizado ao norte da Ilha das Palmas e o Sueste, ao sul dessa ilha. Na desembocadura Sul está localizado o Canal da Galheta, canal este que dá acesso aos navios para o porto de Paranaguá.

O CEP possui ainda uma grande diversidade de ambientes, como planícies de maré, baixios, mangues, marismas, costões rochosos que são fortemente influenciados pela hidrodinâmica, que por sua vez recebe influência principalmente das marés e da descarga de água doce (MANTOVANELLI, 1999). Este estuário é geomorfologicamente caracterizado como um estuário de planície costeira, com presença de deltas de maré em sua desembocadura (ANGULO, 1992)

O eixo Norte-Sul com uma profundidade mais baixa e menor relação comprimento/ largura, possui uma área de mangue de aproximadamente 150 km<sup>2</sup>. Desta forma, devido ao aporte fluvial passar por essas áreas de mangue, com pequenas baías como a do Benito, Itaqui, Guaraqueçaba e Pinheiros, a influência da bacia de drenagem nesta região não é tão direta (NOERNBERG *et al.* 2006).

Já no eixo Leste-Oeste com uma maior relação comprimento/ largura e uma área de mangue de aproximadamente 136 km<sup>2</sup>, têm aporte direto dos principais rios, com maior influência da bacia de drenagem apresentando uma resposta mais rápida e intensa a processos relacionados ao aporte de água doce, como intrusão salina, entrada dos sedimentos fluviais, processos de mistura e a formação de zonas de máxima turbidez (NOERNBERG *et al.* 2006).

A área de estudo localiza-se no setor Leste-Oeste do CEP, abrangendo a Baía de Antonina e a Baía de Paranaguá, tendo como limite oriental o Porto de Paranaguá. Especificamente a área de estudo está limitada entre os paralelos 25° 20' e 25° 35' de latitude Sul e 48° 30' e 48° 45' de longitude Oeste. Neste estudo foi estabelecido o limite entre as baías de Paranaguá e Antonina no estreitamento definido entre a Ponta Grossa e a Ilha do Teixeira (Figura 4).

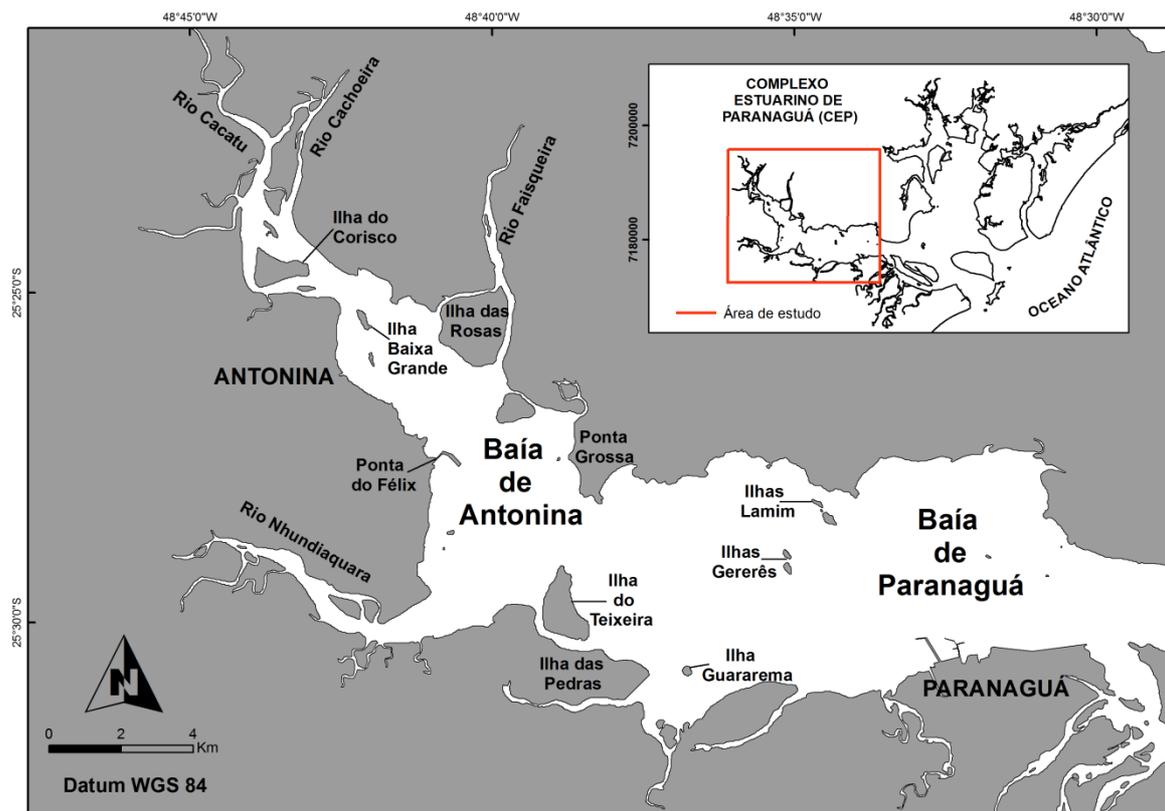


FIGURA 4: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

## 4.2 APORTE FLUVIAL

A hidrodinâmica do CEP é regida por duas forças principais: marés e descargas fluviais. Segundo MANTOVANELLI (1999), o Complexo Estuarino de Paranaguá recebe a drenagem de aproximadamente 70% da área da bacia hidrográfica do litoral do Paraná. Mais especificamente, a autora mostra que para as baías de Paranaguá e Antonina, há o aporte de água doce drenado de uma área de 2188 km<sup>2</sup>, que equivale a 54% da área de drenagem total do complexo. Esses rios nascem nas encostas da Serra do Mar, em altitudes de

100 à 1900 m. São considerados rios perenes devido a uma elevada e regular precipitação da região, além da freqüente condensação de umidade atmosférica (BIGARELLA *et al.* 1978).

Segundo MANTOVANELLI (1999), as bacias hidrográficas de Paranaguá e Antonina apresentam uma deficiência hídrica no inverno, onde a evaporação é, em média, sete vezes maior que a precipitação. No verão ocorre um excedente hídrico, aumentando o aporte de água doce no estuário. Mesmo durante o inverno o rio Cachoeira, é o maior contribuinte de água doce ( $25,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e material particulado em suspensão (MPS) na região N-NW da cabeceira da baía de Antonina. O mesmo pode-se dizer para o rio Nhudiaquara ( $2,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) na porção S-SW da baía de Antonina. Juntos somaram 82% do total do aporte no sistema estuarino, e o rio Cachoeira contribuiu com 88% da carga de material particulado em suspensão durante os anos de 1997 e 1998. Neste mesmo período o aporte médio foi de  $182 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $41 \text{ m}^3/\text{s}$ , para verão e inverno, respectivamente, e uma carga de MPS de 355 ton/dia e 88 ton/dia para verão e inverno, respectivamente (MANTOVANELLI, 1999).

No verão, a contribuição de outros rios aumenta significativamente, principalmente o rio Marumbi ( $12,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e o rio Nhudiaquara ( $34,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) que juntos com o rio Cachoeira ( $46,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) contribuíram com 66% da vazão medida total para o período de estudo. Segundo Soto (2004) o rio Cachoeira tem maior capacidade de armazenamento devido ao tamanho da sua bacia de drenagem e do controle do fluxo que é exercido pela Represa do Capivari (Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza). A vazão deste rio dobrou após a transposição da descarga do rio Capivari para o Cachoeira (CURCIO *et al.*, 1998). Os principais rios e sub-bacias que deságuam na baía de Antonina são apresentados na Figura 5.

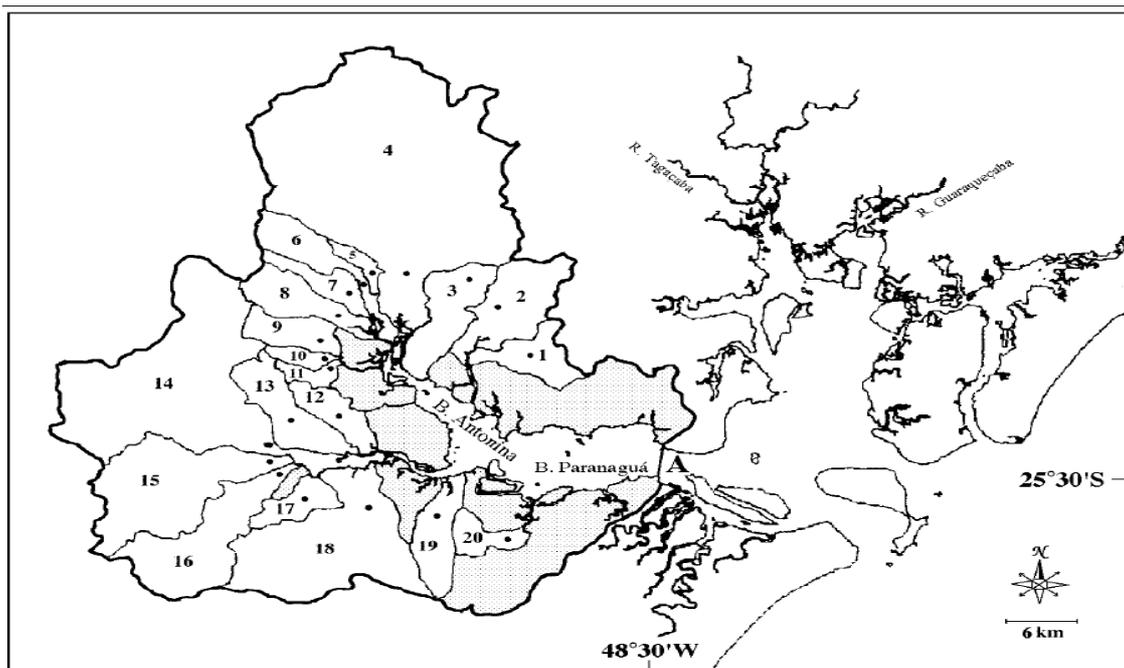


FIGURA 5: ÁREA DE DRENAGEM DAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ (LINHA GROSSA), ATÉ A REGIÃO DA CIDADE DE PARANAGUÁ (SEÇÃO A). DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS DOS RIOS: (1) CEDRO, (2) FAISQUEIRA, (3) CUIÚVA, (4) CACHOEIRA, (5) VENDA, (6) CACATU, (7) MEIO, (8) NUNES, (9) XAXIM, (10) CURITIBAÍBA, (11) MOURA, (12) SÃO JOÃOZINHO, (13) SAPETANDUVA, (14) NHUNDIAQUARA, (15) MARUMBI, (16) PINTO, (17) PASSA SETE, (18) SAGRADO, (19) JACARÉI E (20) PIEDADE, (MANTOVANELLI, 1999).

### 4.3 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E SEDIMENTOS DE FUNDO

Lessa & Angulo (1995), separam o CEP em duas áreas distintas, sendo uma a oeste de Paranaguá, que constitui um paleo-vale inundado, estreito e cortado, e outra área a leste de Paranaguá caracterizada por largas praias de planícies costeiras, e associam essas áreas a duas regressões que ocorreram após máximas elevações do nível do mar.

As características fisiográficas da região dependem da interação entre a drenagem continental e a força das marés, podendo a área ser dividida em três compartimentos distintos: boca do estuário, canal estuarino e zona de meandros (LESSA *et al.* 1998). As baías de Paranaguá e Antonina estão inseridas nos dois últimos compartimentos. Na área do canal estuarino localizam-se as maiores profundidades, variando entre 4m e 10m, com aproximadamente 15 m nas proximidades do porto de Paranaguá. A zona de meandros, que abrange a área da região de Antonina, é caracterizada por canais rasos (<4m), e sofrem forte influência fluvial.

A hidrodinâmica do complexo estuarino e as diferenças geomorfológicas fazem com que a distribuição de sedimentos de fundo ao longo da baía seja heterogênea, com sedimentos variando desde silte fino associado às margens da baía de Antonina até areia grossa e muito grossa nas desembocaduras sul e norte respectivamente (LAMOUR *et al.*, 2004).

Ao longo dos últimos 40 anos, diversos levantamentos foram feitos por vários autores, com o objetivo de caracterizar e mapear os sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá. Bigarella *et al.*, (1970; 1978) fizeram um mapeamento dos sedimentos de fundo a partir de 429 amostras das baías da Paranaguá e Antonina, constatando que os sedimentos nessa região são divididos em três categorias: a primeira, constituída principalmente por areia fina do retrabalhamento da planície costeira; a segunda inclui o material de origem fluvial como: cascalho, areia, silte e argila, e por último um material biogênico que vem do interior do estuário na forma de matéria orgânica. Os mesmos autores constataram ainda que os sedimentos mais grossos estão associados aos canais de maré e desembocaduras dos rios que deságuam na baía de Paranaguá e Antonina, enquanto os mais finos se depositam em ambientes de menor energia.

Soares *et al.*,(1996), caracterizaram a distribuição dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina. Mais tarde, Odreski (2002) fez uma comparação entre estes dois trabalhos e constatou um aumento no diâmetro médio e no grau de seleção dos sedimentos ao longo do tempo.

Soares (1990) comparou no que se refere à dinâmica e área fonte de sedimentos, as diferenças entre as baías de Laranjeiras e Guaraqueçaba com as baías de Paranaguá e Antonina. Observou ainda que na baía das Laranjeiras há três compartimentos distintos de sedimentos, onde a granulometria e os teores de carbonato e matéria orgânica diminuem em direção ao interior da baía.

Em 1995, o Centro de Estudos do Mar e a Petrobrás realizaram através do projeto “Estudos Ambientais em Áreas Oceânicas e Costeiras no Sul do Brasil” um levantamento dos sedimentos de fundo da baía de Paranaguá, com 353 amostras. Odreski *et al.* (2001) e Soares *et al.* (1996) verificaram que

houve mudanças na distribuição dos sedimentos de fundo, comparando o levantamento feito por Bigarella *et al.* (1970) e o da PETROBRAS (1997). De acordo com esses autores houve um aumento do diâmetro médio da distribuição de sedimentos e uma melhora no grau de seleção. Os mesmos autores acreditam que isso possa ter ocorrido devido as atividades de dragagem e desmatamento entre o período dos levantamentos (30 anos), e também devido a construção da usina hidroelétrica Governador Parigot de Souza que interligou as bacias dos rios Capivari e Cachoeira, aumentando consideravelmente o aporte de sedimentos no rio Cachoeira.

Odreski (2002) também ressalta que a baía de Antonina apresentou um aumento no diâmetro médio dos sedimentos devido ao desmatamento e a construção da usina hidrelétrica.

Soares *et al.* (1996) chamam a atenção para uma situação adversa na margem da baía oposta ao Porto de Paranaguá, em 1995 apresentou sedimentos finos que não foram encontrados em 1970. Informações fornecidas pela APPA (1997) através de um relatório em convênio com o Centro de Estudos do Mar, explicam que essa área serviu como sítio de despejo do material dragado da bacia de evolução do porto, onde era despejado sedimento mais fino, explicando essa diferença de sedimentos.

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO

A classificação do Complexo Estuarino de Paranaguá é feita através do diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Hattry (HANSEN & HATTRAY, 1965). Este diagrama é separado em parâmetro de estratificação, onde é determinado pela razão adimensional  $\delta S / \bar{S}$ , sendo que  $\delta S = S_{\text{fundo}} - S_{\text{superfície}}$  é a diferença entre os valores estacionários das salinidades de fundo e superfície e  $\bar{S}$  é o valor estacionário da salinidade média na coluna de água.

O parâmetro de circulação é determinado na sua vez pela razão  $\mu_{\text{superfície}} / \mu_{\text{fundo}}$ , onde  $\mu_{\text{superfície}}$  é o valor da corrente residual na superfície e  $\mu_{\text{fundo}}$  é a descarga fluvial.

De acordo com esse diagrama, Miranda *et al.* (2002) classificaram os estuários da seguinte forma:

Tipo1→ Bem Misturados→ o fluxo residual é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte estuário acima é através da difusão turbulenta.

Tipo2→ Parcialmente Misturados→ o fluxo resultante reverte com a profundidade e o transporte de sal estuário acima é feito através da advecção e da dispersão.

Tipo3→ Característicos principalmente dos fiordes, a advecção é responsável pelo transporte de sal estuário acima.

Tipo4→ São os estuários altamente estratificados, chamados também de estuários do tipo Cunha Salina.

Segundo Marone *et al.* (1997), o CEP é classificado como parcialmente misturado (Tipo 2), com heterogeneidades laterais. Nesse tipo de estuário a salinidade geralmente aumenta de montante para jusante, e o transporte de sal é totalmente dependente das intensidades das correntes.

Mantovanelli (1999) estudou uma secção transversal em frente ao Porto de Paranaguá e verificou que durante o verão a baía apresentou estratificação do Tipo2, sendo que no inverno essa estratificação apresentou-se menos acentuada. A mesma autora também verificou a estratificação lateral da salinidade nessa área e encontrou valores máximos do gradiente horizontal de 1 e 1,6g/kg para o verão e 0,3 e 0,9g/kg para o inverno.

Nesta secção, há um predomínio de difusão turbulenta durante as sizíguas de inverno, aonde ocorre pouco aporte fluvial e intensas velocidades de correntes, resultando em uma corrente residual estuário acima. Nessa situação, o grau de turbulência na coluna de água irá controlar a distribuição de Material Particulado em Suspensão (MPS) com maior resuspensão durante a sizígia e maior advecção durante a quadratura (MANTOVANELLI, 1999).

A mesma autora ainda identifica a Zona de Máxima Turbidez, situada entre Antonina e Paranaguá. A zona de máxima turbidez é uma área onde há intensos processos de floculação, acompanhados por erosão, deposição e resuspensão de sedimentos, que são dependentes do tamanho das partículas e das velocidades de correntes de maré. Para a região estudada, foram encontradas durante a sizígia, concentrações de MPS junto ao fundo 10 vezes maior que durante a quadratura (MANTOVANELLI, 1999b).

#### 4.5 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS

A hidrodinâmica no Complexo Estuarino de Paranaguá é regida principalmente pelo aporte fluvial e pela maré (KNOPPERS *et al.* 1987). Adicionado a estes fatores, está a influência da geometria do CEP, a salinidade e a circulação costeira adjacente. Segundo Marone *et al.* (1997), o Complexo Estuarino de Paranaguá é classificado como Parcialmente misturado do tipo 2, com heterogeneidades laterais. O regime de marés é caracterizado como semi-diurno, com desigualdades diurnas e apresenta forte assimetria em relação às elevações, velocidades de correntes e o tempo da maré, conforme se avança estuário adentro (KNOPPERS *et al.* 1987; MARONE & JAMIYANAA, 1997).

A variação da maré no litoral do Paraná é inferior a 2 metros em períodos de sizígia, isso pode definir um regime de micromaré (MARONE *et al.* 1997), e o tempo de renovação de água doce (descarga) é de aproximadamente 3 a 10 dias, sendo mais reduzido durante o verão, onde há elevado e constante aporte de água doce (MARONE *et al.* 1995).

Em condições normais, ou na ausência de eventos meteorológicos significativos, as componentes de maré que dominam a circulação estuarina no CEP são as componentes semi-diurnas  $M_2$ , que junto com a  $S_2$ , representam cerca de 50% da altura da maré. A componente  $M_2$  é a principal onda de maré na baía de Paranaguá. Suas amplitudes chegam a atingir 0,49 metros em Antonina, correspondendo a uma amplificação de cerca de 50% em relação à desembocadura, e sua defasagem temporal nas preamares e baixa-mares das áreas internas com relação à região costeira chegam a 0,85 h.

As elipses das correntes de maré da  $M_2$  na superfície ultrapassam 90 cm/s no Canal da Galheta (da desembocadura até Paranaguá) e próximo a Ilha das Peças variam de 20 a 50 cm/s. A  $S_2$  possui amplitudes de 0,34 metros em Antonina, o que corresponde a um pouco mais que 40% de amplificação e a defasagem temporal chega a 0,8 h nas áreas mais internas (CAMARGO & HARARI, 2003).

Dentro do estuário o comportamento da maré se altera quanto mais para o interior do CEP, sendo que o range muda de 1,74m na boca, para aproximadamente 2,74m em Antonina, especialmente em marés de sizígia. Durante as marés de quadratura, essa variação é reduzida a menos de 80% dos valores de sizígia, e fortes interações não-lineares entre as componentes permitem que possam ocorrer até seis eventos de maré baixa e alta por dia, com amplitudes diferentes (MARONE & CAMARGO, 1994). As defasagens de período e amplitude que ocorrem ao longo do CEP são apresentadas na Tabela 1.

**TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DE MARÉ PARA A BAÍA DE PARANAGUÁ E ANTONINA. CONSIDERA-SE A GALHETA COMO ZERO DE ORIGEM (MARONE *et al.* 1997).**

Local	Diferença de fase na sizígia (minutos)		Diferença de fase na quadratura (minutos)		Período de vazante (horas)	Período de enchente (horas)	Variação de sizígia (metros)	Variação de quadratura (metros)
	Alta	Baixa	Alta	Baixa				
Galheta	-	-	-	-	6,8	5,5	1,74	1,3
Cobras	69	55	91	75	-	-	2,07	1,68
Paranaguá	88	68	106	93	7,5	4,8	2,09	1,7
Antonina	100	110	132	151	8,1	4,2	2,74	2,02

A partir da desembocadura e, em direção a Antonina há um grande aumento tanto no número de componentes de maré de águas rasas quanto nas suas amplitudes. Estas componentes são geradas por fortes interações não-lineares decorrentes da advecção e da fricção no interior da baía. Além disso, há ainda uma amplificação na altura da maré e um aumento da assimetria na direção e intensidade das correntes provocados pelo afunilamento do estuário e pela diminuição da profundidade a montante (MARONE & JAMIYANAA, 1997; MARONE *et al.* 1997).

As marés também apresentam uma assimetria temporal em direção a cabeceira. A razão média entre os períodos de vazante e enchente aumenta de 1,23 no Canal da Galheta para 1,92 em Antonina. Os estofos de preamares e baixa-mares em Antonina ocorrem com até 1,5 horas de atraso em relação ao Canal da Galheta (MARONE et al. 1997). Os mesmos autores observaram que a diferença de fase para as componentes  $M_2$  e demais componentes semi-diurnas e quarte-diurnas é maior entre o Canal da Galheta e a Ilha das Cobras, do que entre Paranaguá e Antonina, embora as distâncias entre as áreas sejam parecidas.

Os mesmos autores sugerem que alguns componentes (diurnos) se propagam como ondas estacionárias ao longo de toda a baía, enquanto outros componentes se alteram de ondas progressivas na boca da baía, para ondas estacionárias em seu interior. Isso pode ser devido ao fato da diminuição da profundidade, e conseqüentemente, ao aumento do atrito com o fundo, e também do efeito de afunilamento em direção a cabeceira, causando atritos laterais e levando a uma defasagem do nível mais alto da maré de até 90 minutos entre a Ilha da Galheta e Antonina (HERRLING, 2003). A comparação entre as medições de nível das estações de Paranaguá e Ponta do Félix (Antonina) é apresentada na Figura 6.

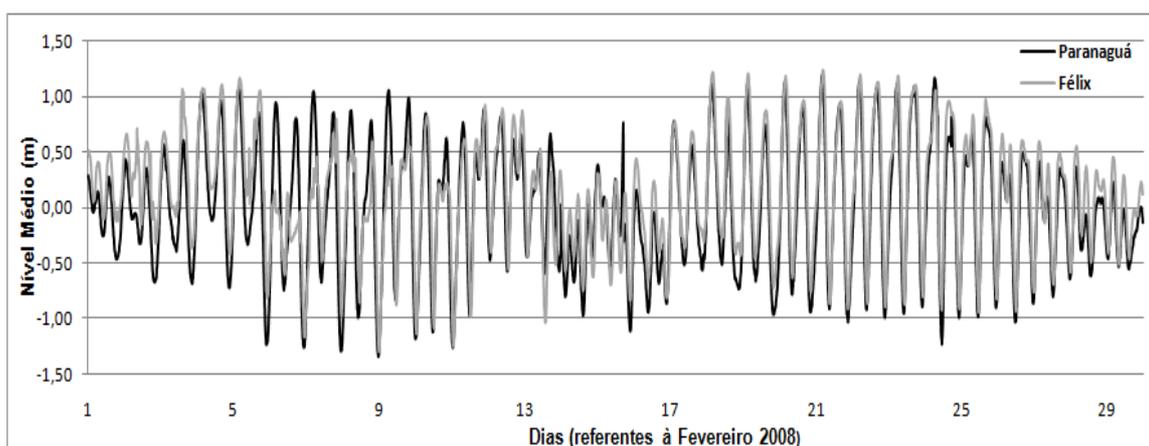


FIGURA 6: VARIAÇÃO DOS NÍVEIS MÉDIOS EM DUAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÕES DURANTE O PERÍODO DE FEVEREIRO DE 2008.

Correntes residuais de maré (efeito barotrópico) podem ser significativamente alteradas pela intensidade e direção dos ventos, tanto na desembocadura quanto no interior da baía (CAMARGO & HARARI, 2003),

sendo que o principal efeito do vento que irá interferir principalmente no interior da baía, é a geração de marés meteorológicas, associadas a eventos de frentes frias, como observado por MARONE & CAMARGO (1994) durante um evento em Agosto de 1993, quando a maré meteorológica provocou um aumento do nível do mar no interior do CEP de até 0,80 metros acima da maré astronômica.

## 5 DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo será abordada uma breve descrição da modelagem numérica em estudos de fluxos hidrodinâmicos, além da descrição da teoria e das formulações usadas pelo modelo deste trabalho.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento tecnológico dos computadores, a modelagem numérica cresceu bastante, viabilizando análises minuciosas de modelos matemáticos e suas propriedades, o que permite compreender sem grande esforço amostral diversas situações que não seriam possíveis, ou seriam custosas, na situação real. Um exemplo são os estudos de modelagem numérica desenvolvidos no CEP, onde a área de estudo é muito grande, e o uso da modelagem numérica permite obter informações de toda área, com economia de tempo e dinheiro. Entretanto, é importante frisar que para a validação dos resultados modelados se faz necessário a utilização de dados coletados *in situ*, os quais permitem verificar se o modelo é representativo ou não, e se sim, o quanto ele representa a situação real.

Para se determinar o tipo de modelo hidrodinâmico a ser utilizado em um corpo d'água, é indispensável verificar o tipo de escoamento e as características da estrutura vertical da coluna d'água, no que diz respeito à estratificação. Em corpos d'água com acentuados gradientes verticais de densidade faz-se necessário incluir os termos baroclínicos (empuxo) (LESSER *et al.*, 2004)

A inclusão destes termos resulta em modelos que utilizam tanto as equações da quantidade de movimento e da continuidade, quanto a equação de estado da água do mar para determinação da densidade, além das equações de transporte de constituintes ativos. Na maioria dos casos, para estuários e ambientes costeiros e oceânicos, estes constituintes são representados pela temperatura e salinidade (ANDRADE & ROSMAN, 2001).

## 5.1 O MODELO DELFT 3D

Este modelo foi criado e desenvolvido pela *Delft Hydraulics*, da Holanda, e funciona de uma forma multidisciplinar, onde o modelo principal apresenta dentro dele módulos de simulações de fluxos, ondas, transporte de sedimento, controle de qualidade de água, desenvolvimentos morfológicos, ecológicos e outros mais. Estes módulos trabalham ao redor de uma mesma interface, interagindo entre si através de “arquivos de comunicação”. Os resultados gerados apresentam-se prontos para serem utilizados para análises em outras simulações dentro do próprio programa (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a). Os módulos que compõem o programa são:

Delft 3D- FLOW → Controle de fluxos

Delft 3D- WAVE → Propagação de ondas

Delft 3D- WAQ → Qualidade de água em grandes reservatórios

Delft 3D- ECO → Modelo ecológico

Delft 3D- CHEM → Componentes químicos e interações

Delft 3D- MOR → Simulações morfodinâmicas

Delft 3D- SED → Transporte de sedimentos coesivos e não coesivos

Delft 3D- PART → Qualidade de água em reservatórios médios e trajetória de partículas

## 5.2 O MÓDULO DELFT 3D-FLOW

O Delft3D-FLOW foi desenvolvido para uma série de aplicações, podendo ser utilizado para: estudos de correntes geradas por marés (forçante barotrópica) e/ou ventos; gradientes horizontais de densidade gerados pelo balanço entre as águas doces dos rios e salgadas do oceano; transporte de materiais dissolvidos e poluentes, além de circulações em regiões costeiras, permitindo a simulação com barreiras físicas, como ilhas e obras costeiras (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

Este módulo é o primeiro passo para qualquer simulação a ser realizada pelo software Delft3D. Ele simula processos hidrodinâmicos resolvendo as

equações diferenciais do *momentum*, e da conservação da massa (ou da equação da continuidade) em duas ou três dimensões, além da equação do transporte de massa para cada constituinte de qualidade da água ou de processos nos sedimentos (LESSER *et al.*, 2004).

As equações hidrodinâmicas são obtidas integrando verticalmente as equações de Navier-Stokes sobre uma camada da coluna d'água, incluindo-se os efeitos de Coriolis, fricção do vento, atrito com o fundo e viscosidade turbulenta (FALCONER, 1993).

As equações da continuidade e do *momentum* descrevem a variação de quatro incógnitas: elevação do nível e as componentes de velocidade  $u$ ,  $v$  e  $w$  na região de interesse nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e no tempo. Para fluxo de sedimentos em suspensão ou de fundo, as equações de transporte de massa são integradas verticalmente considerando efeitos de difusividade turbulenta, dispersão, difusão pelo vento, erosão, deposição e interações químicas e biológicas (FALCONER, 1996).

Este conjunto de equações é resolvido através da discretização da região de interesse em uma malha retangular retilínea ou curvilínea utilizando o método de diferenças finitas. Este método aproxima as equações por séries de Taylor e as resolve para cada ponto (nó) da grade e para cada passo de tempo, ou seja, cada célula computacional que compõe a grade contém um ponto de nível d'água no centro da célula e de profundidade nos vértices, e pontos para velocidades nas direções  $x$  e  $y$  na face das células (FALCONER, 1996). O método de diferenças finitas transforma as equações diferenciais que são contínuas no tempo e/ou no espaço para resolver discretamente as pequenas diferenças entre elementos contíguos de uma grade. Uma vez que estas equações são vistas dentro de um domínio como um conjunto infinito de valores, as mesmas são aproximadas prescrevendo valores finitos nos pontos (nós) do domínio (STOWA/RIZA, 1999).

Em cada ponto do domínio da grade são calculadas cinco ou mais equações através de esquemas explícitos. Estes esquemas permitem explicitar

o termo desconhecido em um tempo futuro em função de termos atuais e passado conhecidos. Este método tem maior facilidade computacional de resolução, porém é mais instável numericamente, exigindo uma grade de maior resolução. Para que a simulação seja estável, se impõe a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy que é determinada através da definição do passo de tempo, de forma que o número de Courant ( $Cr$ ) resultante não seja superior a dez, segundo a seguinte equação:

$$Cr = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad \text{Eq.3}$$

Onde:

<b>Cr</b>	Número de Courant	-
$\Delta t$	Passo de tempo	<b>s</b>
$\{\Delta x, \Delta y\}$	Espaçamento mínimo da grade na direção x e y	<b>m</b>
<b>g</b>	Aceleração da gravidade	<b>m.s<sup>2</sup></b>
<b>H</b>	Profundidade total	<b>m</b>

Esse cálculo define a resolução otimizada da grade, que dependerá do tamanho da região de estudo, do nível de precisão necessário para o estudo de condições de estabilidade numérica e do tempo de processamento.

Segundo Lung (1993), na discretização do modelo, ao se determinar as escalas temporais e espaciais, deve-se levar em conta os seguintes aspectos:

- A extensão da variável e da condição ambiental a ser modelada, em escalas temporais e espaciais.
- Os intervalos espaciais e temporais para processamento do modelo (dimensão da malha e passo de tempo computacional)

### 5.3 FORMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO DELFT3D-FLOW

O módulo hidrodinâmico (FLOW), é capaz de realizar simulações em duas (2D) ou três (3D) dimensões de fluxos instáveis, sendo usado para prever fluxos em águas rasas, áreas costeiras, estuários, rios, lagoas e lagos. Se o fluido é verticalmente homogêneo, é utilizado um modelo 2D, onde é

considerada apenas uma camada do fluido, representada pela resolução das equações de profundidade média (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

Já nas situações em que os campos de fluxos mostram variações significativas na vertical, iniciados pela força dos ventos, rugosidade do fundo ou diferença de densidade, é utilizado um modelo 3D. Neste tipo de modelagem se aplica a chamada transformação da coordenada  $\sigma$  ou profundidade adimensional, de modo a tornar a dimensão vertical independente da profundidade, e desta forma evitar que os elementos de grades interceptem a topografia do fundo (MIRANDA *et al.* 2002). A coordenada  $\sigma$  é definida como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

Eq.4

Onde:

<b>Z</b>	Coordenada vertical no espaço físico	<b>m</b>
$\zeta$	Elevação da superfície livre acima do plano de referência	<b>m</b>
<b>d</b>	Profundidade da coluna d'água abaixo do plano de referência	<b>m</b>
<b>H</b>	Profundidade total da coluna d'água	<b>m</b>

Como já citado acima, as equações são derivadas do sistema de equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível de superfície livre. As equações do movimento e da continuidade, integradas na vertical, são resolvidas levando em conta as aproximações para águas rasas de Boussinesq. Os campos de velocidade e de elevação da superfície são obtidos pela solução da equação de Navier-Stokes (Eq. 5, 6, 7) e da continuidade (Eq.8). Segundo Falconer (1996), essas equações podem ser descritas de uma forma geral como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z}}_2 = \underbrace{X}_3 - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}}_4 + \underbrace{v \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]}_5 - \underbrace{\left[ \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right]}_6 \quad \text{Eq.5}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \left[ \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \quad \text{Eq.6}$$

$$Z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{Eq.7}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Eq.8

Onde:

<b>u, v, w</b>	Componentes de velocidade integradas por camadas nas direções das três coordenadas x,y,z	<b>m.s<sup>-1</sup></b>
<b>t</b>	Tempo	<b>s</b>
<b>X, Y, Z</b>	Forças de corpo nas direções x, y, z	<b>m.s<sup>-2</sup></b>
<b><math>\rho</math></b>	Densidade do fluido	<b>kg.m<sup>-3</sup></b>
<b>P</b>	Pressão do fluido	<b>N.m<sup>-1</sup></b>
<b><math>\nu</math></b>	Coefficiente de viscosidade cinemática	<b>m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup></b>
<b><math>\rho u'u'</math> <math>\rho u'v'</math> <math>\rho u'w'</math></b>	Componentes das tensões de Reynolds na direção x nos planos x,y,z	<b>N/m</b>
<b><math>\rho v'u'</math> <math>\rho v'v'</math> <math>\rho v'w'</math></b>	Componentes das tensões de Reynolds na direção y nos planos x,y,z	<b>N/m</b>

Os termos enumerados e apresentados na equação do momento (equação 5), são descritos como:

- 1- Aceleração local
- 2- Aceleração advectiva
- 3- Forças de corpo
- 4- Gradiente de pressão
- 5- Tensões de atrito laminar
- 6- Tensões de atrito turbulento

Para modelagens em estuários pequenos o efeito de Coriolis pode ser desconsiderado, de forma que as forças de corpo aplicadas nas direções X e Y sejam igual a zero e na direção Z= g (gravidade). Este efeito é desconsiderado (nulo) quando o eixo longitudinal do estuário se encontra no eixo Leste-Oeste e é máximo quando o eixo longitudinal está localizado no eixo Norte-Sul, como é o caso da baía de Paranaguá. Para estuários de grandes dimensões, o efeito

de rotação da Terra não pode ser ignorado, portanto, a aceleração de Coriolis deve ser incluída de forma que:

$$X = 2v\omega \sin \varphi$$

$$Y = 2u\omega \cos \varphi$$

Eq.9

Onde:

$\varphi$	Latitude da área de estudo ( $\approx 25^\circ$ S para a baía de Paranaguá)	<b>Graus</b>
$\omega$	Módulo de vetor de velocidade angular de rotação da Terra ( $\omega = 7.29 \times 10^{-5}$ rad.s <sup>-1</sup> )	<b>rad.s<sup>-1</sup></b>

Para o cálculo da pressão, o termo pode ser representado pela elevação da superfície da água integrando a equação 7 em relação a z:

$$P(z) = P_a + g \int_z \rho dz$$

Eq.10

Onde:

$\zeta$	Elevação da superfície da água acima ou abaixo do nível de referência	<b>m</b>
$P_a$	Pressão Atmosférica	<b>N.m<sup>-1</sup></b>

Derivando-se a equação 10 em função de x, e considerando que a elevação de nível é uma variável dependente no tempo e no espaço ( $\zeta = \zeta(x, y, t)$ ), e que ela é relacionada a estrutura térmica e salina da água, aplicamos a regra de Leibnitz, obtendo-se:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_a}{\partial x} + g\rho \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \int_z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$$

Eq.11

Agora, multiplicando-se por  $^{-1}/\rho$  e considerando-se  $\rho \approx \rho_0$  temos:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{1}{\rho} g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$$

Eq.12

Os três termos do lado direito da equação são respectivamente os efeitos barométricos, barotrópicos e baroclínicos no movimento. Na maioria dos casos o efeito barométrico pode ser eliminado, pois a variação espacial da pressão atmosférica é mínima. O efeito baroclínico, determinado pela temperatura e pela salinidade, representa apenas um décimo do efeito barotrópico, que é consideravelmente o mais importante (MIRANDA *et al.* 2002).

A força dissipativa de energia devido ao atrito horizontal com o fundo é definida pelos termos de tensões de Reynolds. A resolução destes termos é utilizada para calcular os coeficientes de viscosidade turbulenta através das aproximações de Boussinesq, de modo que para a equação 3 obtêm-se:

$$\overline{u'u'} = \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$\overline{u'v'} = \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\overline{u'w'} = \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

Eq.13

Onde:

$\varepsilon$	Coeficiente cinemático turbulento de viscosidade	$m^2 \cdot s^{-1}$
---------------	--	--------------------

Para o cálculo da densidade, a qual é dependente da temperatura, da salinidade e da pressão, utiliza-se a equação de estado da água do mar. Neste modelo pode-se utilizar a equação de estado de Eckart (1958), que despreza o efeito da pressão na densidade ( $\rho = \rho(S, T, 0)$ ) ou ainda a equação do estado da água do mar da UNESCO (FALCONER, 1993).

Todas as equações utilizadas no modelo são resolvidas para as variáveis  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $\eta$  em todo o domínio do modelo para um passo de tempo determinado. Para estuários bem misturados, onde se considera a coluna d'água com propriedades verticalmente homogêneas pode se aproximar as equações tri-dimensionais (3D) em bi-dimensionais (2D), diminuindo o tempo

computacional, e permitindo a simulação por um período maior (FALCONER, 1996).

## **6 MATERIAL E MÉTODOS**

Os dados apresentados neste trabalho foram disponibilizados pelo Centro de Estudos do Mar (CEM), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), juntamente com os dados coletados durante as campanhas de Fevereiro de 2008 referentes ao projeto DESPORT. Vale ressaltar que dados utilizados em modelos anteriores (HERRLING, 2003; FALKENBERG, 2009) foram gentilmente cedidos para novas simulações da área do Complexo Estuarino de Paranaguá.

Tendo em vista que o objetivo desse trabalho tem por foco a modelagem da região da baía de Antonina, a grade utilizada nos modelos anteriores foi alterada e refinada, assumindo um novo domínio e utilizando como contorno aberto uma secção transversal na região em frente ao Porto de Paranaguá, como mostra a Figura 9.

### **6.1 DADOS DISPONÍVEIS NA BAIA DE PARANAGUÁ E ANTONINA**

#### **6.1.1 DADOS DE VENTOS**

Os dados de intensidade e direção dos ventos foram medidos a cada hora pela estação meteorológica do CEM, localizada no Balneário de Pontal do Sul, para os períodos de 01 a 29 de Fevereiro de 2008. Estes dados são apresentados em forma de “Wind Rose” na Figura 7.

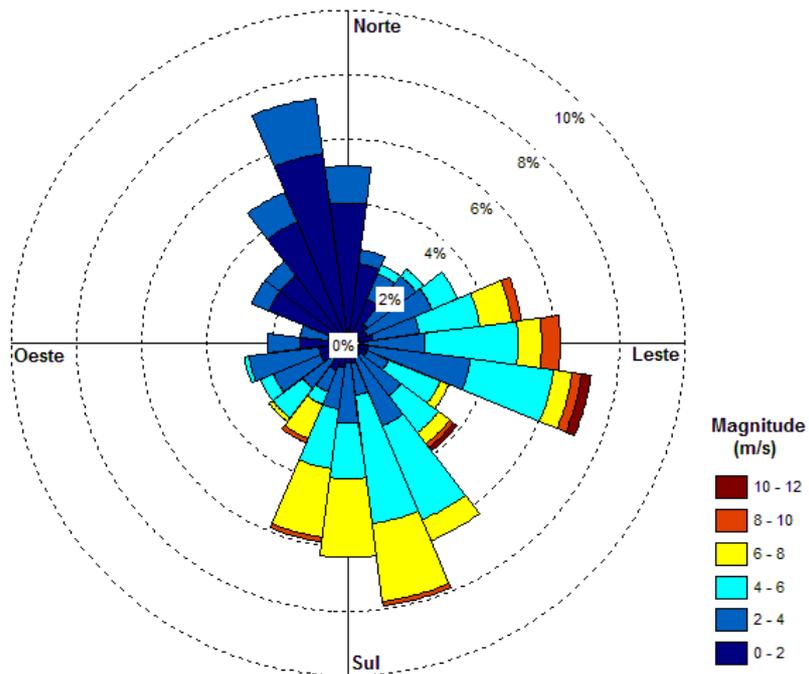
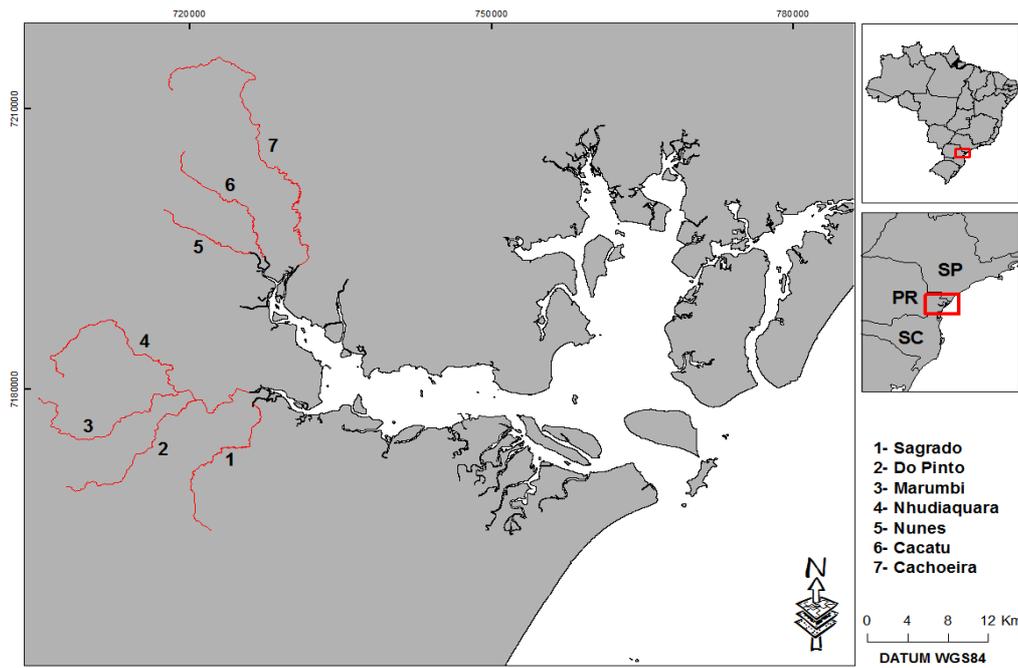


FIGURA 7: DADOS DE INTENSIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTOS DE FEVEREIRO DE 2008 DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO CEM.

### 6.1.2 DADOS DE VAZÃO DOS RIOS

Os dados referentes às vazões dos rios Cachoeira, Nhudiaquara, Cacatu, Nunes, Sagrado, Marumbi e Do Pinto, os quais influenciam na descarga da baía de Antonina foram disponibilizados pela SUDERHSA. A localização dos rios é apresentada na Figura 8.



**FIGURA 8: LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS RIOS QUE DESÁGUAM NA BAÍA DE ANTONINA, UTILIZADOS COMO DADOS DE ENTRADA PARA AS SIMULAÇÕES.**

No modelo foram inseridos valores diários de vazão para o mês de Fevereiro de 2008. Os valores de vazão para os rios utilizados estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2: DADOS DE VAZÕES DIÁRIAS (M<sup>3</sup>/S) DOS RIOS UTILIZADOS NO MODELO (SUDERHSA).

Período	Rio	Rio	Rio	Rio	Rio	Rio	Rio
	Cachoeira	Nhudiaquara	Cacatu	do Pinto	Sagrado	Nunes	Marumbi
01/02/2008	90,71	31,52	5,59	7,95	6,53	5,04	13,18
02/02/2008	83,22	23,22	3,89	6,86	5,85	3,34	9,75
03/02/2008	86,74	19,48	3,25	5,58	4,89	2,6	8,17
04/02/2008	73,69	19,48	5,5	4,91	4,35	3,9	6,76
05/02/2008	51,64	14,25	4,01	4,41	3,99	2,42	5,95
06/02/2008	59,61	12,6	4,34	3,91	3,91	2,03	4,95
07/02/2008	66,28	16,76	12,3	6,85	3,91	3,06	12,71
08/02/2008	78,86	16,45	7,44	4,54	6,52	4,77	6,28
09/02/2008	64,28	32,25	4,52	4,41	4,44	2,51	5,36
10/02/2008	45,97	12,6	2,65	4,29	3,57	2,18	4,79
11/02/2008	56,82	15,35	2,65	4,29	4,53	2,1	4,93
12/02/2008	49,8	12,05	2,55	10,42	10,72	2,18	9,02
13/02/2008	78,41	20,72	3,79	6,67	12,99	2,53	9,75
14/02/2008	51,81	14,53	2,65	4,66	4,26	1,88	8,17
15/02/2008	69,13	21,97	2,95	5,57	3,74	3,67	7,09
16/02/2008	68,46	15,35	2,85	4,66	4,22	9,98	6,44
17/02/2008	75,12	17,34	3,91	5,63	5,55	2,69	5,22
18/02/2008	68,91	15,97	2,37	4,54	5,08	2,1	7,11
19/02/2008	63,84	11,59	2,85	3,79	4,22	1,88	5,5
20/02/2008	60,64	12,13	3,89	3,29	3,69	1,81	5,22
21/02/2008	63,62	10,8	5,07	3,29	3,57	1,6	4,79
22/02/2008	67,11	19,09	5,15	3,04	3,4	2,19	4,27
23/02/2008	68,23	30,88	4,69	13,14	3,24	2,1	37,38
24/02/2008	85,19	30,12	8,72	8,89	19,46	10,82	16,61
25/02/2008	76,98	16,11	3,56	5,04	7,3	2,79	10,19
26/02/2008	68,01	21,05	4,52	5,46	6,33	4,69	11,5
27/02/2008	78,15	80,65	9,67	44,65	35,43	28,35	71,59
28/02/2008	88,44	46,33	10,26	26,34	22,24	5,27	45,47
29/02/2008	75,55	27,68	4,58	17,78	10,23	3,34	17,69

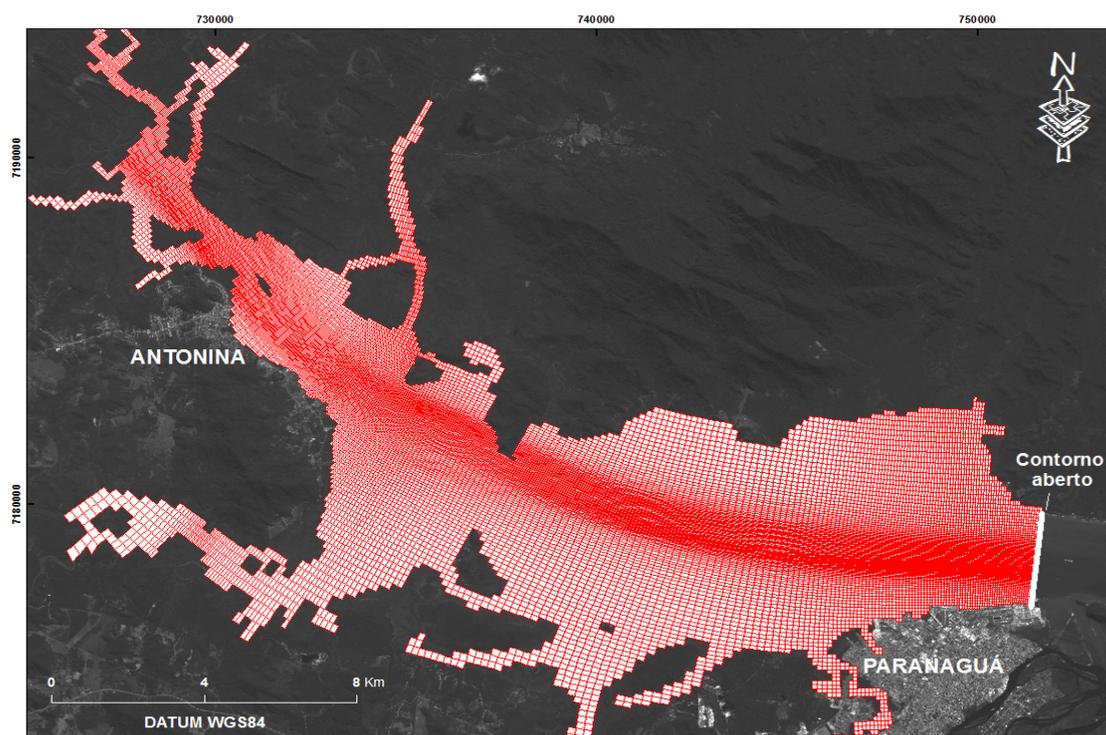
### 6.1.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTO

As definições das condições de contorno aberto são de grande importância para a validação do modelo, uma vez que elas representam a influência de áreas externas, ou seja, a área além da área do modelo, a qual não é modelada. Há dois passos importantes na definição das condições de

contorno aberto: o primeiro é a definição dos locais do contorno e o segundo é determinar o tipo de forçante hidrodinâmica (HAYATININGSIH, 2007).

A importância da definição dos locais de contorno aberto é para se evitar efeitos de contornos locais (barreiras físicas) nas condições hidrodinâmicas no domínio do modelo. É necessário colocar o contorno aberto a partir da área de interesse até o contorno fechado. Neste trabalho, como dito anteriormente, o contorno aberto da área modelada está localizado em frente ao porto de Paranaguá, como mostra a Figura 9.

A forçante hidrodinâmica usada no contorno aberto, depende dos dados disponíveis para aquele local. Ela é executada para desenvolver as condições hidrodinâmicas ao longo dos contornos do modelo. Neste trabalho foi utilizada como forçante os níveis de água medidos no porto de Paranaguá.



**FIGURA 9: GRADE COMPUTACIONAL COM CONTORNO ABERTO EM FRENTE AO PORTO DE PARANAGUÁ.**

### 6.1.4 DADOS DE MARÉ E CORRENTES

Os dados de maré utilizados no contorno aberto foram fornecidos pela Praticagem, e obtidos através de um sensor de pressão instalado no porto de Paranaguá, para o período de 01 a 29 de Fevereiro de 2008.

Sensores de pressão também foram utilizados para a região da Ponta do Félix, em Antonina para o mesmo período.

A variação do nível médio do mar, nas duas estações de medição utilizadas neste trabalho, Paranaguá e Ponta do Félix (Antonina), para o mês de Fevereiro de 2008 é apresentada na Figura 10. Nota-se uma diferença no range de maré, com uma maior amplificação em Antonina.

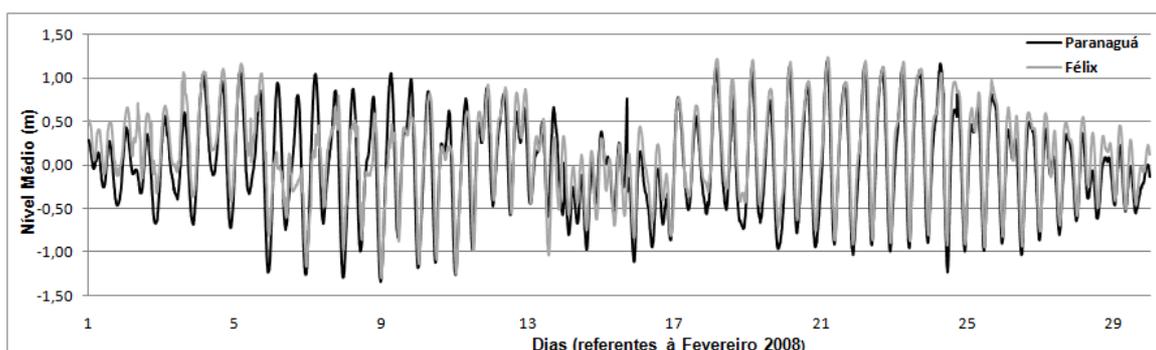


FIGURA 10: VARIÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM DUAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÕES DURANTE O PERÍODO DE FEVEREIRO DE 2008.

Os dados de magnitude (velocidade e direção) de correntes utilizados na análise de sensibilidade e na calibração do modelo foram coletados num transecto na frente do porto de Paranaguá utilizando um ADP (*Acoustic Doppler Profiler*) e em duas campanhas amostrais: i) durante a maré de quadratura, nos dias 13 e 14 de fevereiro de 2008 e ii) durante a maré de sizígia, nos dias 20 e 21 de fevereiro de 2008. As campanhas são referentes a um período de 25 horas, com dados a cada duas horas, abrangendo dois ciclos completos de maré. Os pontos de monitoramento com sensores de pressão e o transecto feito com um ADP são apresentados na Figura 11.

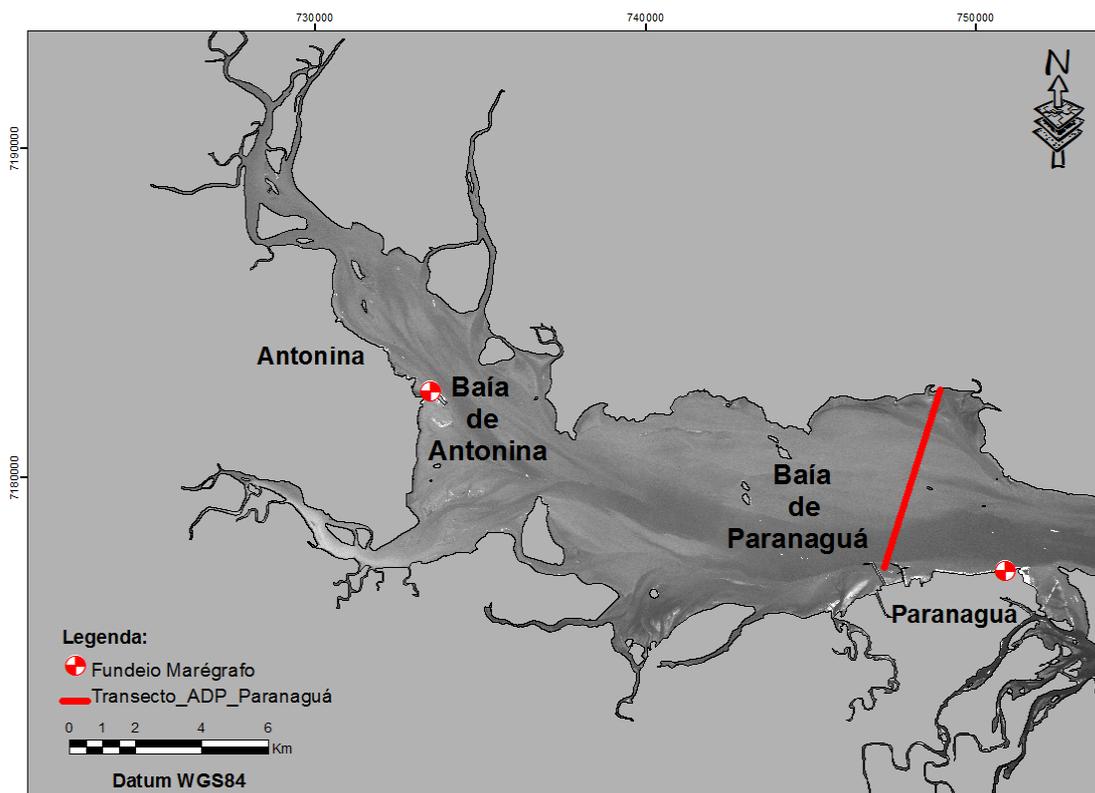


FIGURA 11: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO UTILIZADOS PARA MEDIÇÕES DOS NÍVEIS E DOS TRANSECTOS COM ADP NAS BAÍAS DE ANTONINA E PARANAGUÁ.

### 6.1.5 BATIMETRIA

Os dados batimétricos foram obtidos de diversas formas, sendo que a digitização de cartas náuticas foi a mais utilizada. Ressalta-se que estas cartas são antigas e podem conter erros. Outra parte foi obtida com medidas de ecobatímetros ao longo do canal de navegação, cedidas pela Administração dos Portos da Paranaguá e Antonina (APPA). Além disso, imagens de satélite (Landsat TM5 e Landsat TM7), foram interpretadas por Noernberg (2001) e utilizadas na determinação da linha de costa, bancos de areia e extensão das áreas de mangue. A batimetria gerada como produto final e utilizada pelo modelo é apresentada na Figura 12.

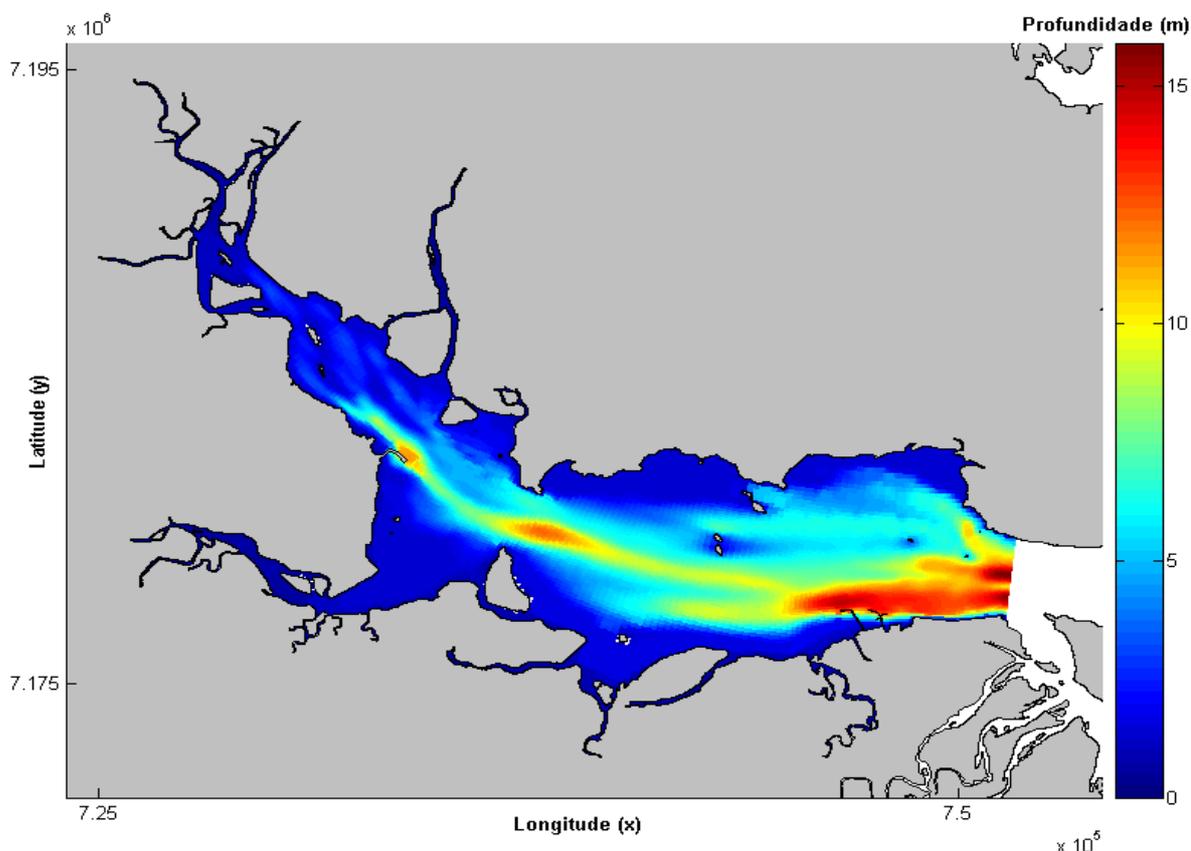


FIGURA 12: MAPA BATIMÉTRICO UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES NAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA.

### 6.1.6 GRADE NUMÉRICA

A grade numérica do modelo foi gerada, manipulada e visualizada utilizando o módulo RGFRID do próprio Delft3D. A grade deste trabalho foi criada baseada na grade originalmente feita por Herrling (2003), gerando um novo domínio a ser modelado. Esse domínio tem como contorno aberto a região na frente do porto de Paranaguá.

A partir daí foi feito um refinamento, onde mais células foram inseridas de forma que a resolução horizontal da grade fosse aumentada. Esse processo é denominado “*nesting*”. Após a realização deste procedimento, os contornos abertos do modelo passaram a ser dirigidos pelas medidas de nível da água, utilizando os dados de Paranaguá. A grade numérica utilizada neste trabalho, em comparação com a grade original de Herrling (2003) é apresentada na Figura 13.

Cada grade tem características particulares de propriedades em relação ao arranjo das células, e sua qualidade depende diretamente das mesmas. As propriedades que mais influenciam nessas características são a resolução, a ortogonalidade e o gradiente espacial (suavidade ou *smoothness*).

A resolução da grade é o tamanho que cada célula possui nas áreas a serem modeladas, e é indicada pela raiz quadrada da área da célula da grade ( $R = \sqrt{A}$ , sendo  $A$  definido como a área da célula da grade), devendo apresentar valores menores nas áreas de interesse, onde são necessários resultados mais precisos. É importante levar em conta que o tamanho de uma célula deve ser no máximo 1,4 vezes maior do que a célula adjacente.

Se o objetivo é modelar uma área com maior detalhamento, a distância entre os pontos de cada célula tem que ser menor, já para áreas marginais, onde não se faz necessário tanto refinamento, essa distância pode ser maior, economizando tempo computacional (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

A ortogonalidade é o ângulo, ou o cosseno do ângulo entre as linhas de grade nas direções  $m$  e  $n$  (que no plano cartesiano correspondem aos eixos  $x$  e  $y$ ). A grade tem que ser ortogonal a fim de salvar alguns termos de transformações computacionais custosos em relação ao tempo. Para uma melhor qualidade dos resultados, é aconselhado que os valores de ortogonalidade variem entre  $0,02 < \phi < 0,04$ , onde  $\phi$  é o cosseno do ângulo entre as linhas de grade (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

O gradiente espacial (suavidade) é a proporção entre os comprimentos das células com as células vizinhas a medida que se afasta da área de interesse, em ambas as direções das coordenadas locais  $m$  e  $n$ . Essa medida deve ser usada para minimizar erros nas aproximações do método de diferenças finitas. É aconselhável que os valores não ultrapassem 1,2 nas áreas de interesse, e 1,4 nas áreas mais afastadas (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

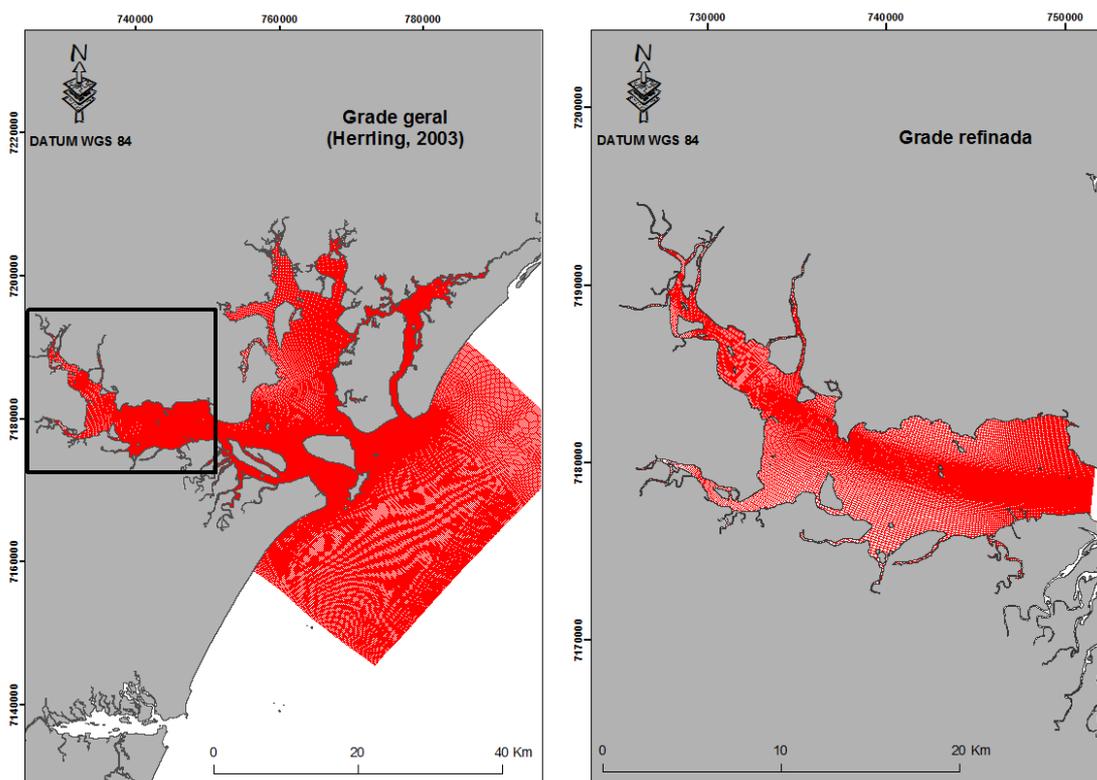


FIGURA 13: COMPARAÇÃO ENTRE A GRADE ORIGINAL (HERRLING, 2003) E A GRADE REFINADA PARA ANTONINA E PARANAGUÁ.

## 6.2 ALGORÍTMO “WET AND DRY”

Os estuários e baías geralmente contêm grandes áreas rasas e relativamente planas separadas e intercaladas por canais profundos e riachos. Quando o nível da água está alto, toda a região é inundada, porém quando a maré baixa, as áreas rasas ficam expostas, e por fim os fluxos ficam confinados apenas aos canais profundos. As planícies de maré “secas” podem ocupar uma área substancialmente significativa de toda superfície. A acurácia da reprodução dessas áreas é uma importante característica de um modelo numérico baseado nas equações de águas rasas.

Alguns rios com canais compostos apresentam um canal principal que sempre carrega o fluxo em qualquer situação, e uma ou duas planícies de maré, que irão carregar o fluxo apenas em situações de extrema descarga dos rios. Quando as planícies de maré estão cobertas pela água, a capacidade de

drenagem do rio também aumenta, e conseqüentemente reduz o gradiente de nível de água local.

A utilização desse algoritmo é baseada no fato de que em uma região com muitos manguezais e extensas planícies de maré, o represamento dessa água pode não ser muito bem representado na modelagem. Isso ocorre devido ao fato de considerar que todo o escoamento corra pelo canal principal, mais profundo, não considerando os pequenos canais capazes de represar boa quantidade de água.

O processo de aplicação desse algoritmo no Delft-3D consiste basicamente em utilizar pontos de profundidade próximos ao contorno fechado como um ponto de nível de água médio, e não como uma profundidade total de um ponto de velocidade próximo ao contorno fechado. Ou seja, os pontos próximos ao contorno fechado devem possuir um valor de profundidade muito parecido com os valores de linha de costa, e não com valores que representam uma área somente “seca”. Isso permite que os níveis de água invadam essas áreas que anteriormente eram consideradas secas durante todo o período.

Em um modelo numérico, o processo de “*Drying and Flooding*” é representado removendo pontos da grade do domínio do fluxo que “ficam secos” quando a maré seca e adicionando pontos “alagados” quando a maré enche. A aplicação da técnica do “*Wet and Dry*” gera um movimento descontínuo do contorno fechado, e pode gerar pequenas oscilações nos níveis de água e nas velocidades de correntes. Essas oscilações introduzidas por esse algoritmo são pequenas se o tamanho das células da grade é pequeno (alta resolução) e se o fundo possui um gradiente suave

### **6.3 PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS**

Os parâmetros físicos e numéricos são utilizados no modelo, inicialmente na análise de sensibilidade através de valores definidos como “padrões”, ou baseado em trabalhos anteriores. A partir dos primeiros

resultados, os parâmetros são ajustados para obter um resultado que mais se aproxime das condições reais do ambiente.

Os principais parâmetros estudados neste trabalho para a validação do modelo foram o coeficiente de atrito, adotado aqui pelo valor do coeficiente de Chezy uniforme para todo o domínio modelado, e a viscosidade turbulenta, que é responsável pelo movimento turbulento ao longo da coluna d'água.

O coeficiente de atrito (Chezy) é inversamente proporcional a rugosidade, ou seja, quanto mais fino for o sedimento, menor a rugosidade, e maior será o coeficiente de Chezy. Com isso, o parâmetro de rugosidade de fundo, além de controlar a estabilidade numérica do modelo, tem papel significativo na distribuição de energia dentro do sistema, regulando a magnitude das correntes e alturas de maré simuladas.

O modelo leva em consideração somente a influência da rugosidade de fundo em simulações hidrodinâmicas em escalas onde há a possibilidade de negligenciar as tensões tangenciais laterais e verticais (*free sleep conditions*), quando estas não produzem efeitos nos fluxos gerados (RIBAS, 2004).

Simulações com diferentes valores ( $30 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ ,  $45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  e  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ ) foram realizadas para este coeficiente no mesmo período em que houve medições de campo, a fim de comparar os valores de nível e de corrente medidos e simulados. Estes resultados foram comparados entre si e com os resultados obtidos em campo.

Foram realizadas também simulações com diferentes valores de viscosidade turbulenta. Este é um parâmetro para o fluxo de quantidade de movimento turbulento (tensão de Reynolds). Quando há movimento turbulento, pode haver pequenos vórtices na superfície, que transmitem essa energia da superfície para o fundo.

A magnitude da viscosidade turbulenta depende da estratificação da coluna d'água. Se a coluna d'água estiver bem misturada, há pouca variação de densidade vertical e a coluna d'água será facilmente atingida pela viscosidade turbulenta. Se a coluna d'água estiver bem estratificada, e houver

um forte gradiente de densidade, a mistura turbulenta é suprimida, e não atinge camadas mais profundas.

Segundo Franklin (2009), este parâmetro não apresenta variações significativas quanto aos resultados do modelo, porém tem papel fundamental para garantir a estabilidade do modelo, no sentido de controlar as oscilações turbulentas e garantir a uniformidade do escoamento. Com base nessas informações foram realizadas simulações com valores de viscosidade turbulenta de 1,0; 5,0 e 10,0  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ . Estes valores não são mostrados nos resultados, pois não apresentaram diferenças significativas nas respostas do modelo, optando-se, portanto, em utilizar o valor fixo de 1,0  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  para todas as simulações. Os parâmetros utilizados inicialmente na análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 3.

**TABELA 3: PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS UTILIZADOS NO MODELO HIDRODINÂMICO**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Condição inicial	Nível= 0 metros
Condição de Contorno	Séries de níveis de Paranaguá
Passo de tempo	1 minuto
Aceleração da gravidade	9,81 $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Densidade da água	1015 $\text{kg}.\text{m}^{-3}$
Rugosidade de fundo	Chezy= 65 $\text{m}^{0,5}.\text{s}^{-1}$
Viscosidade turbulenta	1 $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Vazão	Valores diários ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para Fev.2008
Ventos	Valores horários para Fev.2008- Estação CEM

## **7 RESULTADOS**

Segundo STOWA/RIZA (1999) a modelagem é constituída basicamente de 4 etapas: Concepção do modelo, Análise de sensibilidade, Calibração e Validação. Com base nesta classificação este trabalho foi assim dividido para apresentação dos resultados.

### **7.1 CONCEPÇÃO DO MODELO**

A concepção do modelo trata-se da escolha da ferramenta a ser utilizada, definição da área de domínio, incluindo as características dos processos físicos que serão estudados, definição dos dados de entrada e dos parâmetros físicos e numéricos do modelo.

### **7.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO**

O objetivo da análise de sensibilidade é conhecer o comportamento do modelo e a resposta deste às variações, principalmente dos parâmetros físicos e numéricos, permitindo fixar os valores numéricos aonde o modelo se mostre adequado e com isso realizar a calibração do mesmo (TOBÓN, 2002).

Os resultados foram analisados para verificação da análise de sensibilidade do modelo em relação às condições de contorno, dos parâmetros numéricos e físicos. As condições de contorno incluem a utilização de séries de nível d'água registradas em frente ao porto de Paranaguá. Os parâmetros numéricos e físicos incluem a resolução da grade, a rugosidade de fundo, a viscosidade turbulenta, a variação de vento (intensidade e direção) e a contribuição do aporte de água doce através dos rios (vazão diária).

As análises de sensibilidade consistiram na avaliação da diferença dos resultados medidos com os simulados referentes a variações de nível d'água, e magnitude de correntes em pontos de monitoramento dentro do domínio do

modelo para diferentes cenários. Além da simples comparação entre os resultados, optou-se também pela avaliação do nível residual (*Nível residual = Nível modelado – Nível medido*), produzido em cada um dos cenários simulados, como forma de facilitar na escolha do melhor cenário para a calibração.

As simulações foram feitas para todo o mês de Fevereiro de 2008 para obterem-se os valores de níveis d'água, e em períodos específicos (13/02/2008-12h00 à 21/02/2008 12h00) para obterem-se os dados de correntes que foram medidos nos períodos de 13/02/2008-12h00 à 14/02/2008-12h:00 e de 20/02/2008- 11h40 à 21/02/2008 12h00.

### **7.2.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO**

Como dito anteriormente, as condições de contorno são extremamente importantes para a qualidade dos resultados do modelo, uma vez que são elas que impõem às forças geradoras do movimento dentro do modelo, assim, a definição das condições de contorno aberto determina a influência de condições hidrodinâmicas da área adjacente nos processos regentes dentro do domínio modelado.

A condição de contorno utilizada como forçante nas simulações foi a série de níveis d'água medidas na região em frente ao porto de Paranaguá, para o período de 01/02/2008 a 29/02/2008. As simulações foram feitas com um passo de tempo de 1 minuto. A comparação dos resultados entre os níveis medidos e modelados para a condição de contorno é apresentado na Figura 14.

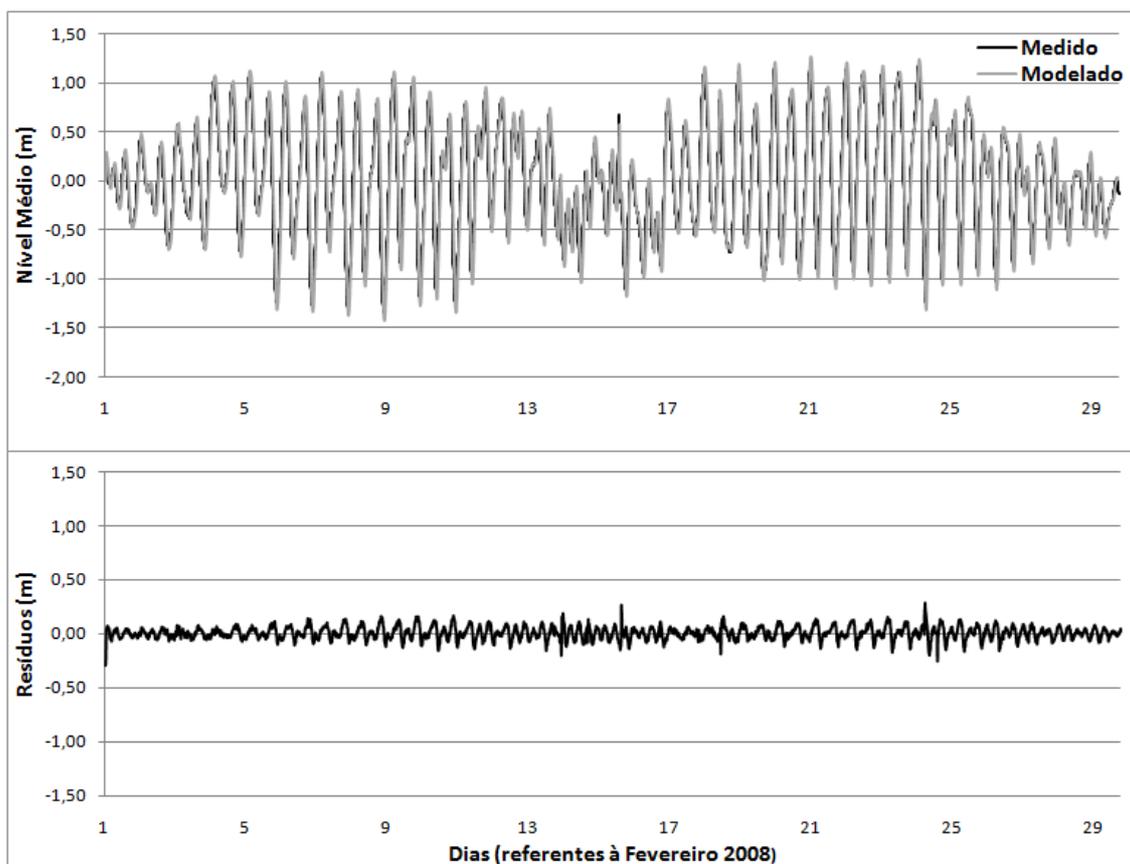


FIGURA 14: COMPARAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA DA CONDIÇÃO DE CONTORNO COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL.

Os dados modelados seguiram o padrão dos dados medidos, como era esperado na condição de contorno. Os maiores níveis residuais encontrados foram de 1,01 m, positivo, no dia 15 de Fevereiro, e outro de 0,60 m, positivo, durante um evento de maré alta no final do período de maré de sizígia. Estes dois eventos são devido ao equipamento não ter medido os dados durante duas horas nesses dias, com isso, durante o período dessa janela não houve boa representação da realidade. Outros dois valores menores de 0,48 m e 0,38 m, negativos, foram encontrados respectivamente em um momento de maré baixa em uma maré de quadratura e em outro momento de maré baixa no início da sizígia, e fora o fato de serem erros do instrumento, não se encontrou outra explicação satisfatória.

Os valores de nível d'água e nível residual para os períodos específicos do mês de Fevereiro de 2008 (13/02/2008 à 21/02/2008), no qual foram

realizadas coletas de campo, para comparação dos dados são apresentados na Figura 15.

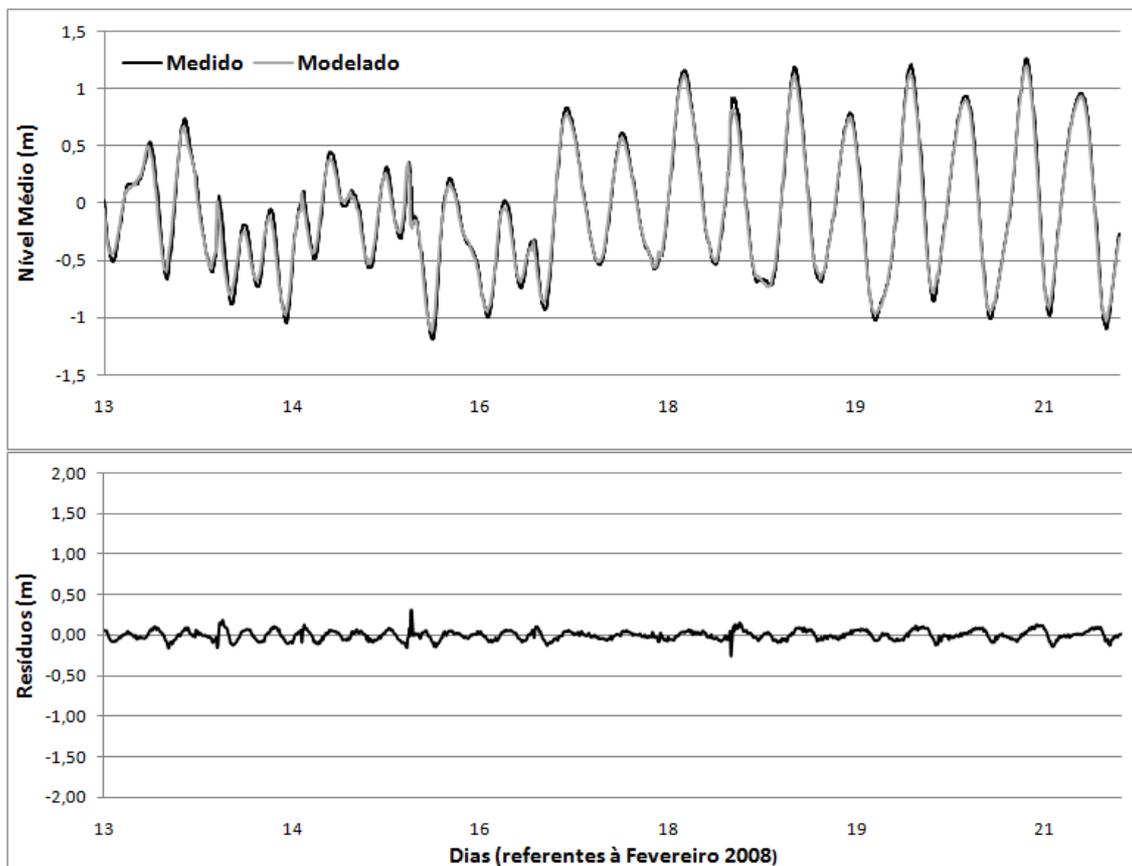


FIGURA 15: SÉRIES DE NÍVEL D'ÁGUA E NÍVEL RESIDUAL NA CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O PERÍODO ESPECÍFICO DE 13/02/2008 A 21/02/2008.

Além de utilizar os dados de níveis d'água de Paranaguá, foi utilizado também neste trabalho, dados de níveis do mesmo período, para a região do Terminal Portuário da Ponta do Félix, em Antonina. Este ponto foi utilizado para verificar o comportamento de propagação da maré ao longo do estuário, e para calibração do modelo (Figura 10).

Os dados apresentam uma pequena defasagem de amplitude de uma estação para outra, o que pode ser explicado pelo comportamento da maré conforme avança estuário adentro. Segundo Pugh (1987), a interação das componentes de maré e o atrito com o fundo e com as margens fazem com que suas amplitudes e períodos sejam modificados gerando assim, componentes não-lineares da maré dentro do estuário. Esse comportamento será discutido com maior detalhe mais adiante.

Para confirmação da qualidade dos dados utilizados para a condição de contorno, testes estatísticos foram realizados em um ponto de monitoramento na região da Ponta do Félix para observação da propagação da maré ao longo do domínio do modelo, os resultados são apresentados na Tabela 4. Os testes foram feitos para o período de (13/02/2008-12h00 à 21/02/2008- 12h00), correspondente ao período de marés de quadratura e sizígia, e também o período equivalente a coleta de dados de correntes. Os testes estatísticos foram realizados em relação aos níveis residuais, sendo o Erro Médio Quadrático utilizado para avaliar a qualidade do ajuste e a média e o desvio padrão como parâmetros adicionais.

**TABELA 4: RESULTADOS ESTATÍSTICOS ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO DURANTE O PERÍODO DE (13/02/2008-12H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX. VALORES EM METROS.**

Teste Estatístico	Chezy ( $m^{0.5}s^{-1}$ )		
	30	45	65
<b>Média</b>	-0,1048	-0,1100	-0,1110
<b>Desv.Padrão</b>	0,2872	0,2502	0,2451
<b>Erro Quadr.Médio</b>	0,3056	0,2732	0,2689

Através do teste do Erro Médio Quadrático pode-se observar que o melhor ajuste dos dados foi obtido com valor de Chezy de  $65 m^{0.5}/s^{-1}$ . O maior valor de desvio padrão ocorreu com valor de Chezy de  $30 m^{0.5}/s^{-1}$ . A discrepância dos valores do cálculo do Erro pode estar relacionada à distribuição de sedimentos na baía.

Segundo Bigarella *et al.*(1970,1978) havia nessa região uma mistura de sedimentos que variam desde silte, argila, até areia fina e cascalho. Já os sedimentos mais grosseiros estavam associados aos canais de maré e desembocaduras dos rios. Odreski (2001) fez uma comparação destes dados com dados de PETROBRAS (1997) e constatou um aumento do diâmetro médio da distribuição de sedimentos e uma melhora no grau de seleção. Com base nestas informações pode-se supor que, devido a essa dinâmica de sedimentos na região, o ideal seria a utilização de um mapa de rugosidade com

valores do coeficiente de Chezy variável ao longo da baía para obtenção de um melhor resultado.

Além dos testes estatísticos é necessário avaliar as vantagens e desvantagens que cada condição de contorno apresenta para a definição de qual destas representa melhor o fenômeno físico a ser modelado. A utilização de séries de níveis como forçantes possui a vantagem de incluir nas simulações os efeitos de maré meteorológica somado aos efeitos de maré astronômica, representando bem os eventos de tempestades.

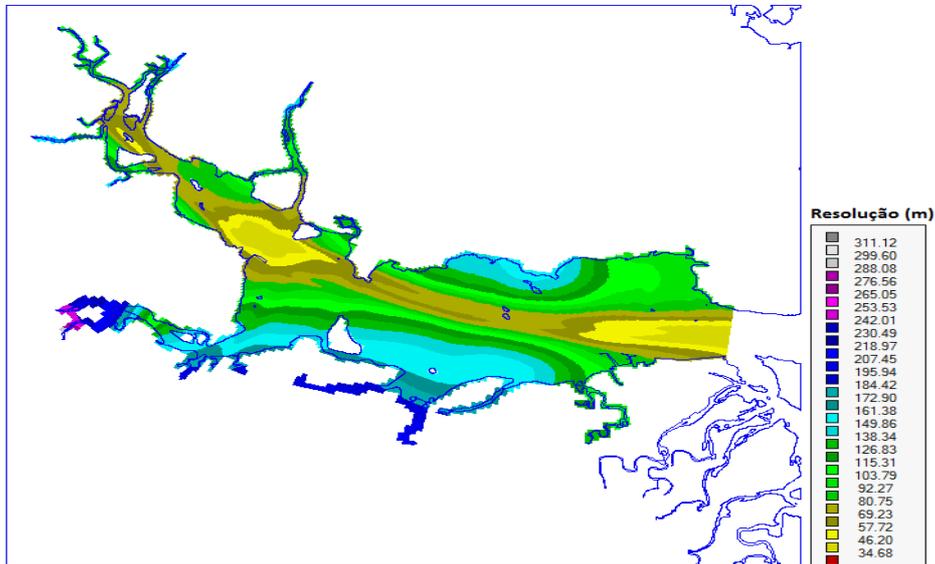
Além disso, segundo Tobón (2002), ao utilizarmos o valor real medido de elevação como contorno, a calibração do modelo pode ser concentrada nos parâmetros físicos internos. A desvantagem é o fato das simulações dependerem de dados de nível na fronteira aberta para cada período que se deseja simular, ou seja, não é possível fazer previsões com dados de nível como condição de contorno para outros períodos que não os da medição. A outra possibilidade seria impor no contorno os níveis através das componentes harmônicas da maré, mas neste caso perder-se-ia a forçante meteorológica.

Outro fator na utilização de dados de níveis, é que muitas vezes eles não estão disponíveis, e quando estão, nem sempre são de boa qualidade. Entretanto, neste estudo a fronteira se localiza em Paranaguá e os dados utilizados são da estação maregráfica de responsabilidade da Praticagem e, salvo os casos isolados mencionados, pode-se confiar na qualidade dos dados.

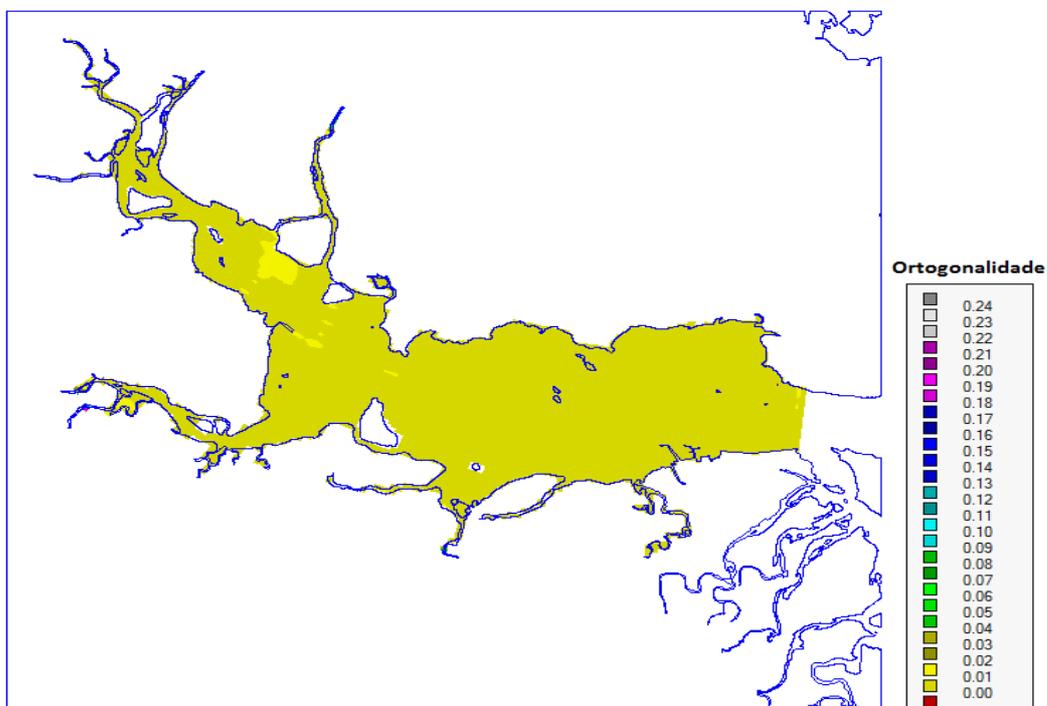
### **7.2.2 PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA**

Uma grade curvilínea foi refinada até a obtenção de uma resolução de número de células total de 21010, sendo 160 na direção M e 276 na direção N, dando atenção as propriedades que indicam a qualidade da grade como a ortogonalidade e o gradiente espacial (Capítulo 6- Item 6.1.6). A resolução foi definida entre 34 m e 180 m, ficando entre 34 m e 70 m na região do canal de navegação e entre 80 m e 160 m nas margens. Abaixo são apresentadas as

propriedades da grade, com seus valores, que ficaram dentro dos padrões aceitáveis para uma boa representação do modelo (Figura 16, 17 e 18).



**FIGURA 16: RESOLUÇÃO DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. O TAMANHO DAS CÉLULAS VARIOU ENTRE 34 M E 180 M.**



**FIGURA 17: ORTOGONALIDADE DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. OS VALORES FICARAM DENTRO DO INTERVALO RECOMENDADO ENTRE 0,02 E 0,04.**

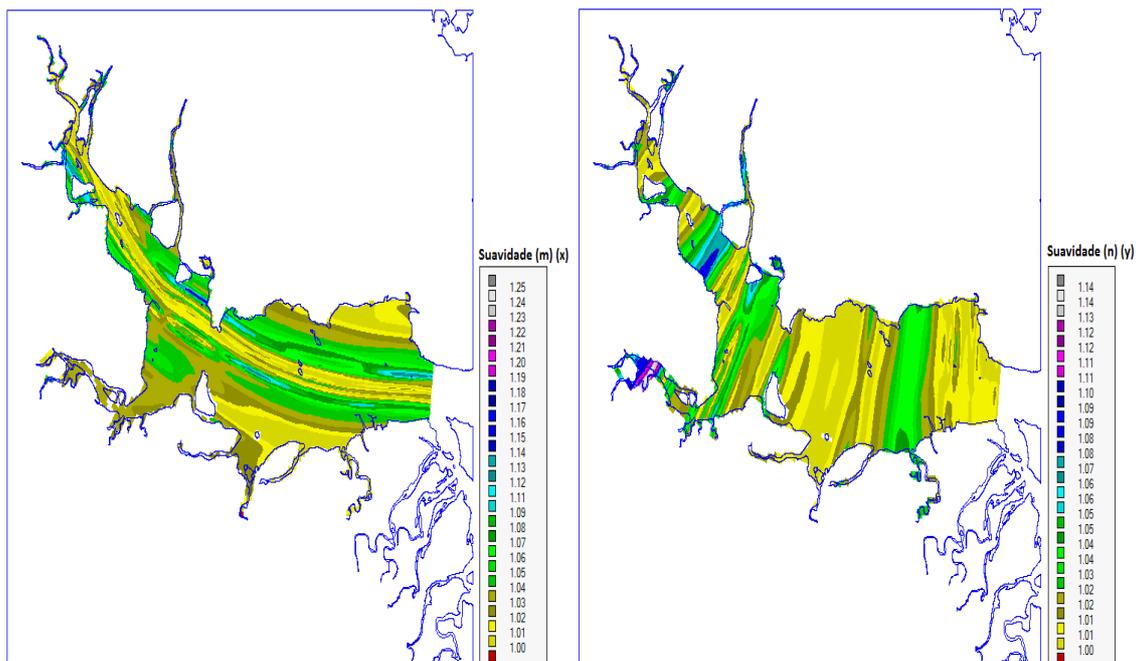


FIGURA 18: RESOLUÇÃO ESPACIAL NOS EIXOS (M, X) E (N,Y) DA GRADE BATIMÉTRICA UTILIZADA NO MODELO DAS BAÍAS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. OS VALORES FICARAM DENTRO DO VALOR MÁXIMO QUE É DE 1,2 NAS ÁREAS DE MAIOR INTERESSE E 1,4 NAS ÁREAS MAIS AFASTADAS.

### 7.2.3 RUGOSIDADE DE FUNDO

Em modelos hidrodinâmicos, os efeitos de rugosidade de fundo sobre os níveis d'água são simulados através da variação dos coeficientes de atrito. Como dito anteriormente, neste trabalho foi utilizado o parâmetro de Chezy uniforme para todo o domínio.

Diversos valores de coeficientes de Chezy foram testados, sendo que o valor máximo utilizado para o cálculo foi de  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ . Segundo Falkenberg (com.pessoal.; 2009), para essa região, em razão ao tipo de sedimento, o coeficiente de atrito dificilmente ultrapassa esse valor. Também segundo Ribas (2004), valores maiores que  $50\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  causam instabilidades nos fluxos próximos às fronteiras abertas do domínio modelado, fato este que foi visto neste trabalho com valores a partir de  $85\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ .

### 7.2.3.1 COMPARAÇÃO DE NÍVEL

A sensibilidade do modelo em relação à rugosidade de fundo está representada na Figura 19, através da comparação de níveis d'água medidos na região do Terminal da Ponta do Félix (Antonina) com valores modelados usando diferentes valores de Chezy para a mesma região. A comparação dos níveis residuais gerados entre os três valores de Chezy utilizados é apresentada na Figura 20.

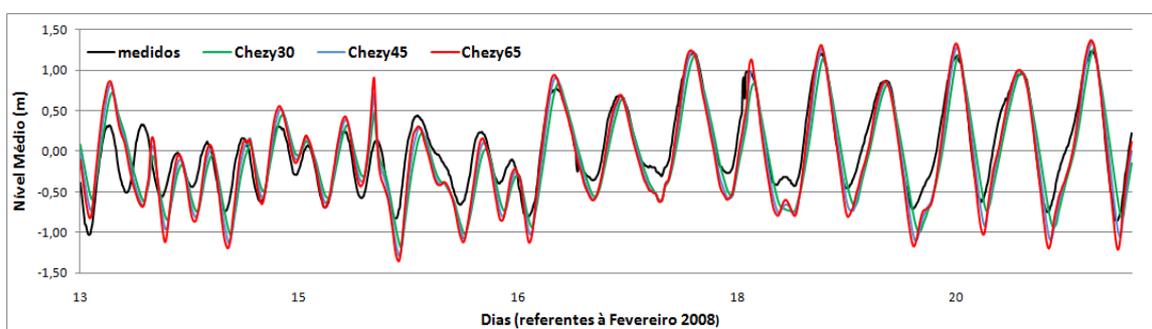


FIGURA 19: COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA MEDIDOS NA PONTA DO FÉLIX E OS DIFERENTES VALORES DE COEFICIENTES DE CHEZY TESTADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.

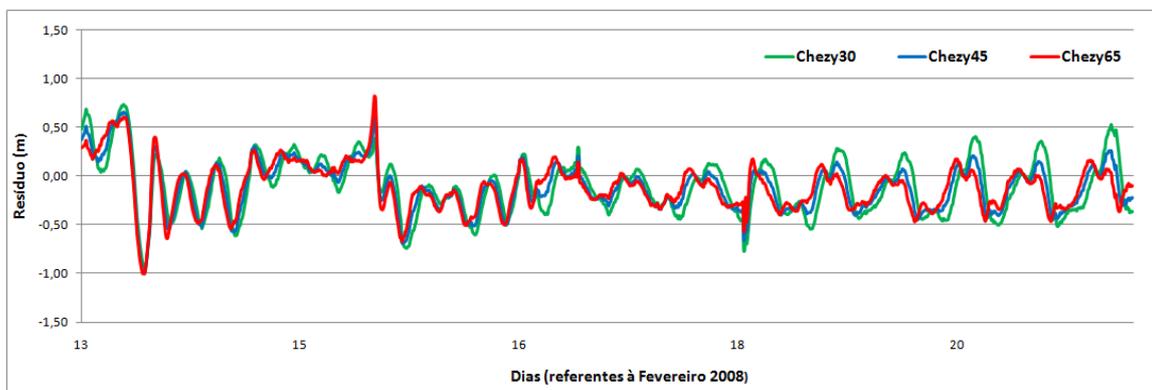


FIGURA 20: NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA PONTA DO FÉLIX.

Podemos observar que os valores de níveis modelados apresentaram uma pequena diferença no comportamento de fase, sendo mais evidente durante os períodos de estofa de enchente e de vazante. O gráfico mostra ainda uma pequena diferença nos valores de amplitude, mais evidentes

durante os eventos de maré baixa. Pode-se associar este fato a instabilidade do modelo durante estes períodos, devido à empoçamentos que ocorrem nas planícies de maré próximos aos períodos de baixa mar. Outra forma de ver as causas destas instabilidades é que, na maré baixa, alguns efeitos não-lineares são mais pronunciados, e estes apesar de serem representados no modelo, são mais difíceis de simular. Os valores de níveis residuais mostram que estes foram os períodos de maior diferença entre os dados medidos e os modelados.

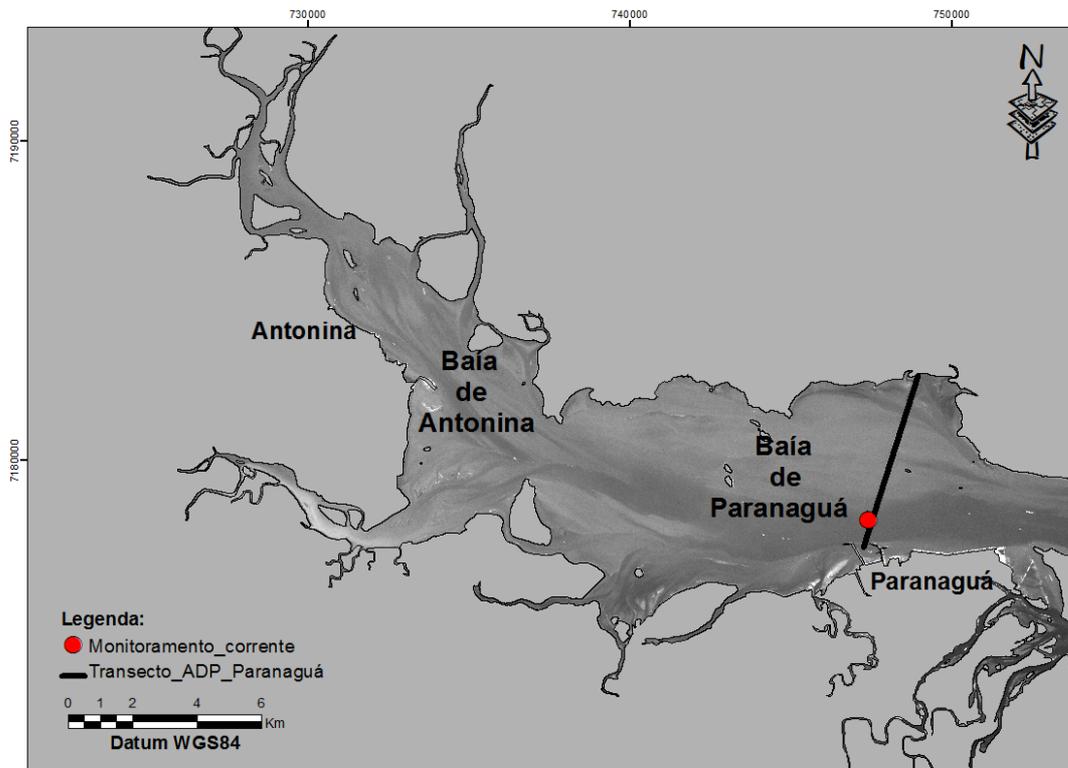
Nota-se também que o modelo foi muito sensível as mudanças na rugosidade de fundo, quanto aos valores de amplitude. Os três valores de coeficiente de Chezy produziram variações de maré com maior amplitude do que o observado em campo. Este fato pode estar relacionado ao comportamento da maré dentro do estuário, uma vez que ela pode sofrer uma alteração em sua forma de propagação devido à geometria do local e passar a se propagar de forma *estacionária*, onde o nível da água praticamente sofre os efeitos de elevação de uma forma homogênea.

Também, nessa região há forte influência das componentes não-lineares da maré, que são geradas pela interação das chamadas *componentes puras* nos termos advectivos e de atrito das equações hidrodinâmicas. A geração destas componentes não-lineares à medida que a maré se propaga estuário adentro pode não estar sendo bem representada pelo modelo. Esse fenômeno potencializa ainda mais a diferença entre os níveis medidos e modelados, possivelmente pelo fato de não ter sido ajustado corretamente para este tipo de comportamento, que é ainda menos entendido do que os processos puramente lineares.

### **7.2.3.2 COMPARAÇÃO DE CORRENTES**

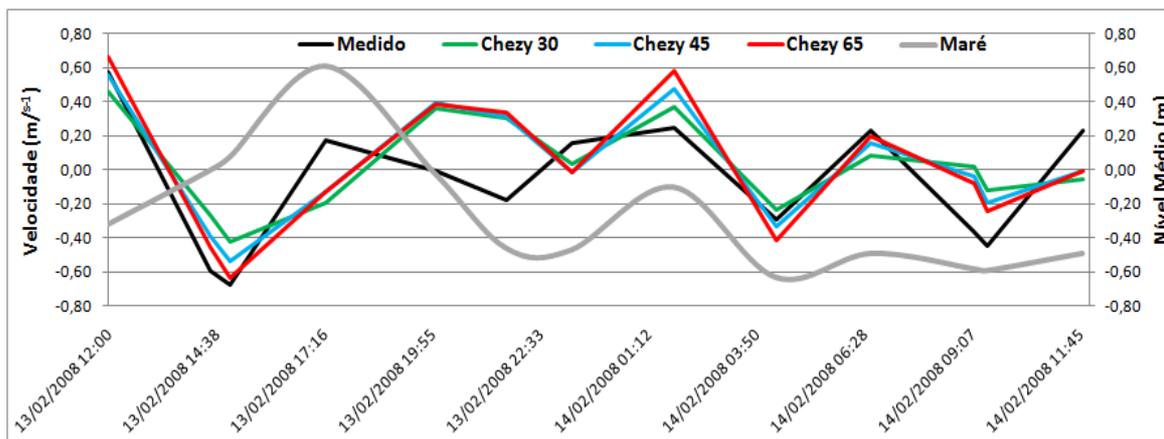
Os valores de corrente medidos e modelados foram comparados também para verificar a qualidade do modelo. Os valores simulados foram gerados para os mesmos horários coletados pelo ADP. É preciso ressaltar que todos os dados de correntes são referentes à região na frente do porto de Paranaguá, não havendo outros pontos de monitoramento para este período.

Foram selecionadas as medidas do transecto realizadas na mesma região do ponto de monitoramento. O ponto de monitoramento das correntes e o transecto do ADP utilizados neste trabalho são apresentados na Figura 21.

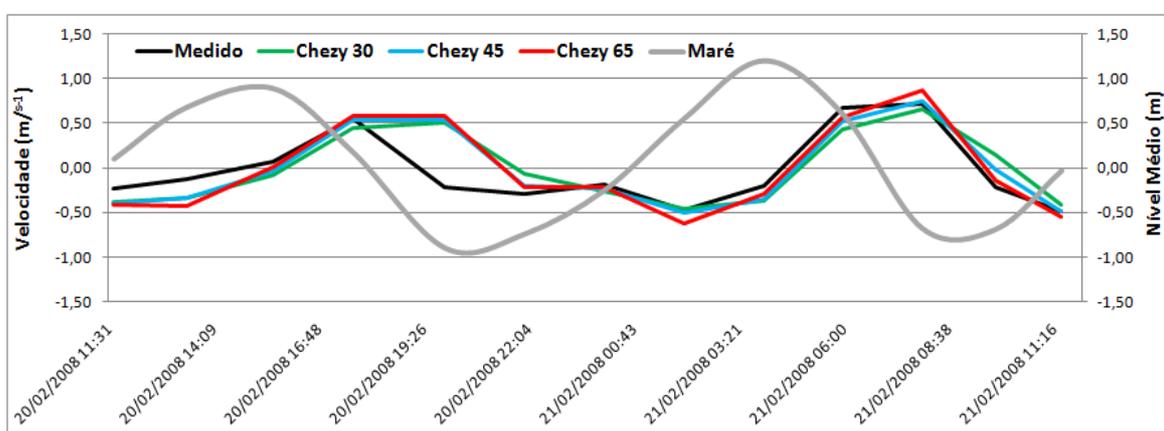


**FIGURA 21: PONTO DE MONITORAMENTO DAS CORRENTES E TRANSECTO MEDIDO COM ADP NA REGIÃO DA FRENTE DO PORTO DE PARANAGUÁ.**

A sensibilidade do modelo em relação à magnitude das correntes em marés de quadratura (13/02/2008-12h00 a 14/02/2008- 12h00) e sizígia (20/02/2008- 11h40 a 21/02/2008 12h00), geradas nas três simulações para a região do Porto de Paranaguá em comparação com a maré medida é apresentada nas Figuras 22 e 23. Foi utilizada esta região para calibração das correntes devido à disponibilidade de dados para este período.



**FIGURA 22: VELOCIDADE DAS CORRENTES GERADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ EM MARÉ DE QUADRATURA (13 E 14 /02/2008).**



**FIGURA 23: VELOCIDADE DAS CORRENTES GERADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS COEFICIENTES DE CHEZY SIMULADOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ EM MARÉ DE SIZÍGIA (20 E 21 /02/2008).**

Pode-se observar que o período de quadratura apresentou maior discrepância nos valores de velocidade de corrente, possivelmente devido ao fato de que, segundo Marone & Camargo (1994) neste período os efeitos não-lineares entre as componentes de maré são mais fortes e podem gerar fenômenos de até seis eventos de maré alta e maré baixa por dia, com diferentes amplitudes, o que é dificilmente bem representado na modelagem.

Dentro do CEP as interações não-lineares produzem componentes de pequeno fundo que ficam mais evidentes durante os períodos de quadratura. Em situações onde a velocidade das correntes é baixa, a interação entre as componentes não-lineares são mais fortes e aumentam estuário adentro.

Segundo Wright & Norton (2000), fica mais difícil de prever os erros de cálculos batimétricos e tensão de cisalhamento de fundo durante o período de quadratura, onde há baixas velocidades de fluxo, ou quando há pouca coluna d'água. O período de sizígia apresentou melhores resultados nos valores de velocidade de corrente em todo o período comparado, justificando os melhores resultados em períodos onde ocorram maiores fluxos de água.

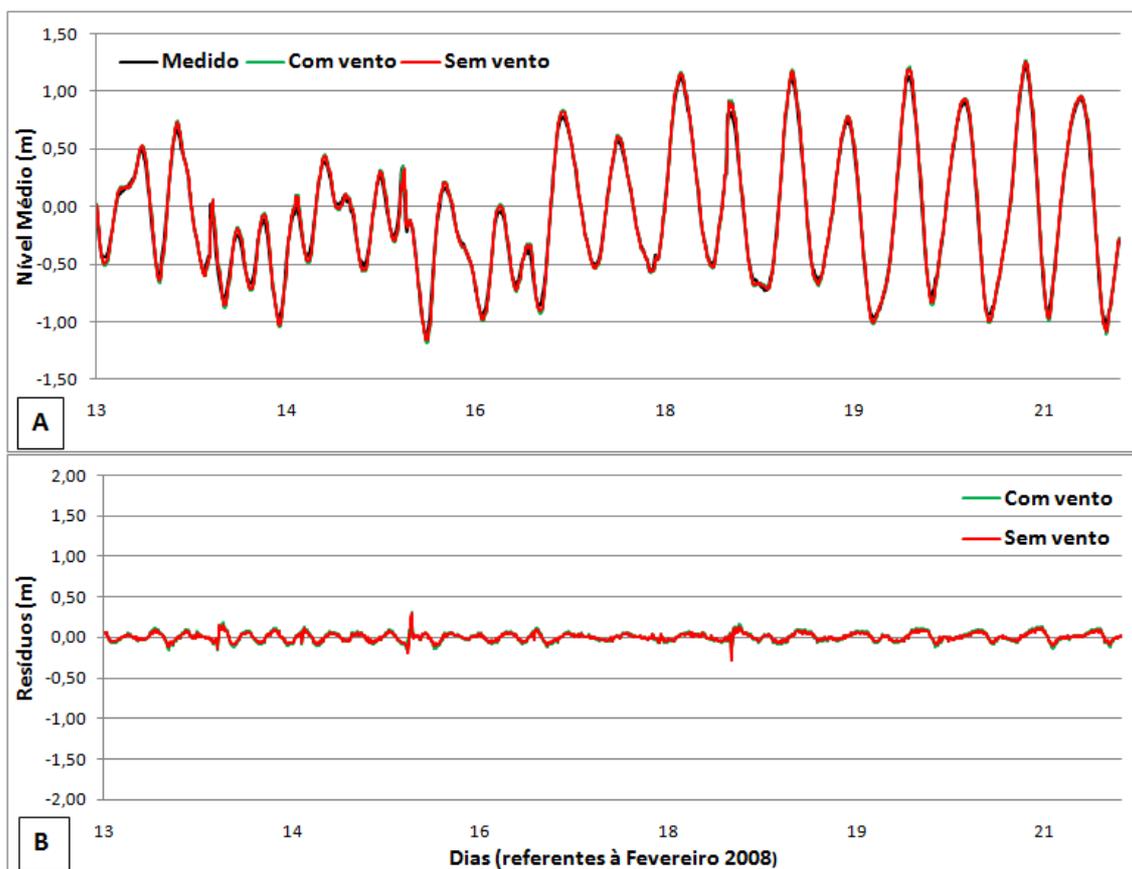
Contudo, pode-se observar que, tanto para a quadratura quanto para sizígia, as velocidades máximas de enchente e de vazante coincidiram com a variação do nível.

Através das análises de correntes pode-se observar também a sensibilidade do modelo quanto a diferentes valores de Chezy devido às diferenças nas magnitudes das correntes geradas. Devido ao fato do coeficiente de Chezy e a rugosidade serem inversamente proporcionais, pode-se perceber que quanto maior os valores do coeficiente, maior são as velocidades das correntes geradas. Desta forma pode-se concluir que o modelo apresentou melhores resultados com valores de coeficiente de Chezy de  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , mesmo tendo apresentado resultados muito parecidos com valores de  $45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ . Portanto resolveu-se adotar o primeiro valor para apresentação dos outros resultados e para o processo de validação.

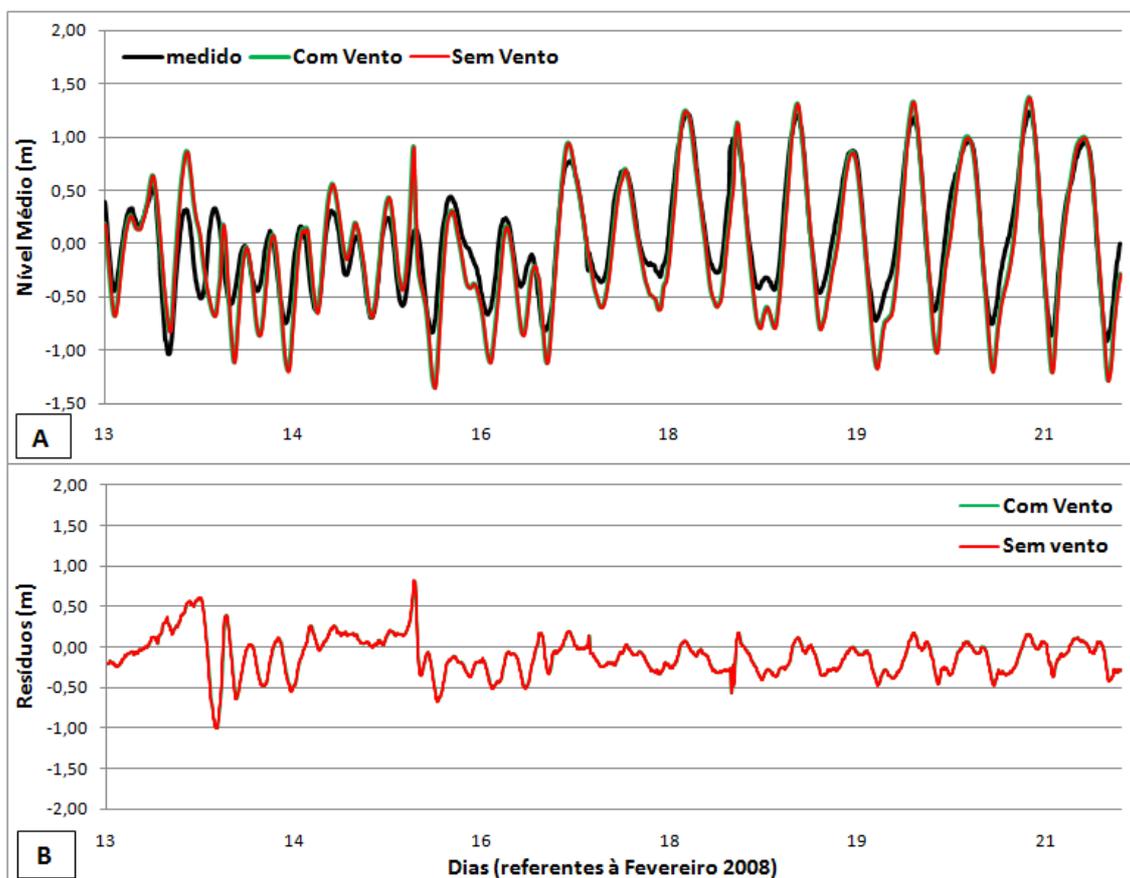
#### **7.2.4 EFEITOS DO VENTO**

O vento age na superfície e transfere energia para as camadas superficiais gerando ondas de gravidade e fluxos superficiais. Quanto maior a velocidade do vento, maior a fricção, chamada de tensão de cisalhamento, e maior o fluxo superficial. Esse efeito de cisalhamento passa para camadas mais profundas através da fricção interna determinada pela viscosidade turbulenta. Os ventos agindo em uma superfície como a de um estuário, podem gerar fluxos, induzir oscilações e efeitos de empilhamento.

Neste trabalho foram realizadas simulações com e sem efeito dos ventos, para o período de (13/02/2008-00h00 à 22/02/2008- 00h00), utilizando os dados horários da estação do CEM, representados na Figura 7. Nas figuras abaixo são apresentados os valores de níveis do Porto de Paranaguá (Figura 24) e Ponta do Félix (Figura 25) com seus respectivos valores de níveis residuais.



**FIGURA 24: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS SIMULADOS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.**

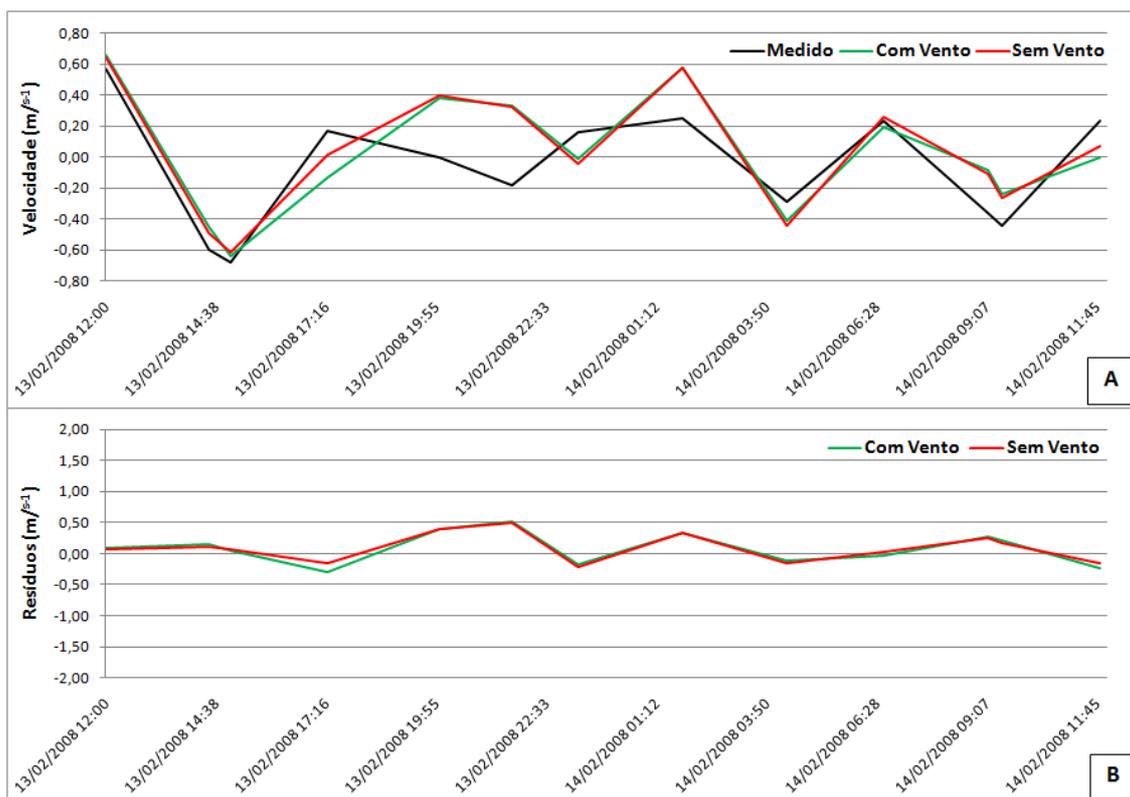


**FIGURA 25: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS SIMULADOS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.**

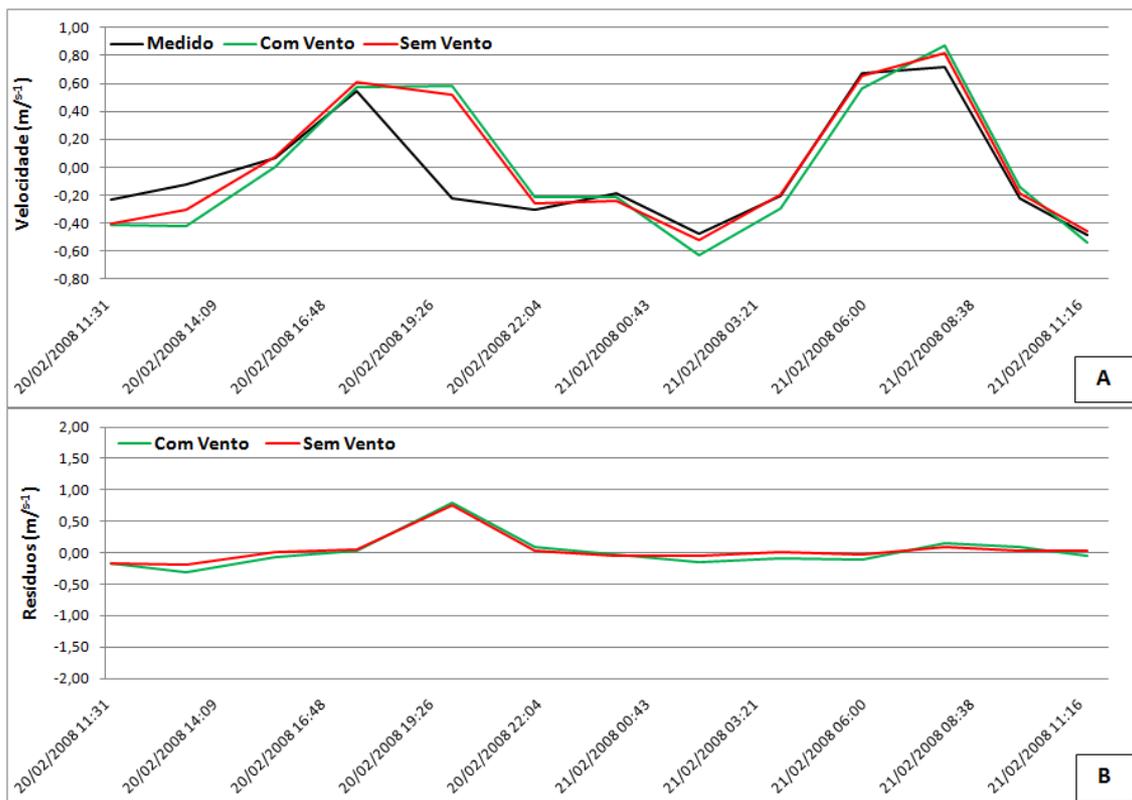
Os valores de níveis d'água simulados com e sem ventos não apresentaram diferença significativa em relação às simulações com campos de ventos. Entretanto, podemos notar apenas no início da série uma discrepância entre os dados medidos e simulados, muito possivelmente causado pelos efeitos de inicialização do modelo.

Os gráficos mostram que a curva simulada para as duas situações foram praticamente iguais, e os gráficos de resíduos confirmam essa informação, não apresentando nenhuma discrepância na série temporal. Isso possivelmente está associado ao fato de que, segundo Mantovanelli (1999), o CEP é um estuário dominado por duas forças principais, as marés e o aporte fluvial. Outro fato importante que pode ser associado a este resultado é que durante o período de simulação (13/02/2008-00h00 à 22/02/2008- 00h00), não houve nenhum evento extremo de ventos, ou marés meteorológicas, permanecendo apenas com leves brisas.

As simulações também foram geradas para os valores de velocidade corrente no Porto de Paranaguá para o período de quadratura (13/02/2008-12h00 à 14/02/2008-12h00) e sizígia (20/02/2008-11h00 à 14/02/2008-12h00). Abaixo são apresentados os resultados da simulação de correntes para os dois cenários com os gráficos da velocidade e do nível de resíduos para o período de quadratura (Figura 26) e sizígia (Figura 27), respectivamente.



**FIGURA 26: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008-12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.**



**FIGURA 27: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM EFEITO DO VENTO PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008-12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.**

Os resultados das velocidades de correntes simulados apresentaram um comportamento muito parecido com o resultado dos níveis d'água, sem diferenças significativas entre os cenários com vento e sem vento. O gráfico apresenta apenas uma pequena diferença em magnitude nos períodos de pico da maré de sizígia, sendo que o cenário sem vento comportou-se, de uma forma discreta, melhor que o cenário simulado com vento. Pode-se perceber através dos níveis dos resíduos que os dois cenários não apresentam discrepâncias entre os resultados das simulações.

Por fim, mesmo não apresentando diferenças significativas no resultado, optou-se por utilizar os dados de ventos em todas as simulações, em virtude da possibilidade de que durante a validação pudesse haver um período de intensos campos de ventos, que pudessem indicar um evento de maré meteorológica, e que possivelmente trariam variações nos resultados modelados.

## 7.2.5 APORTE FLUVIAL

O aporte dos rios em estuários é de suma importância para a caracterização da hidrodinâmica dessa região e, quando somado a influência da maré e outras forçantes físicas (ondas e ventos), determina o grau de estratificação da coluna d'água. A diferença de densidade entre a água dos rios e a água marinha pode gerar uma grande variabilidade nos fluxos predominantes, que podem variar desde escalas de tempo de horas (devido a interação com as marés) à variações sazonais, decorrentes do aumento de vazão dos rios nos períodos de chuvas mais intensas.

Simulações foram realizadas com os diferentes parâmetros de Chezy para um cenário onde não foram consideradas as vazões. Os valores de níveis d'água para a Ponta do Félix e as correntes para a região do porto de Paranaguá foram comparadas para este cenário.

Abaixo, são apresentadas as comparações dos níveis d'água para Ponta do Félix (Figura 28) e para o Porto de Paranaguá (Figura 29), para o período de simulação de (13/02/2008- 00:00 à 22/02/2008- 00:00) com análise de níveis residuais.

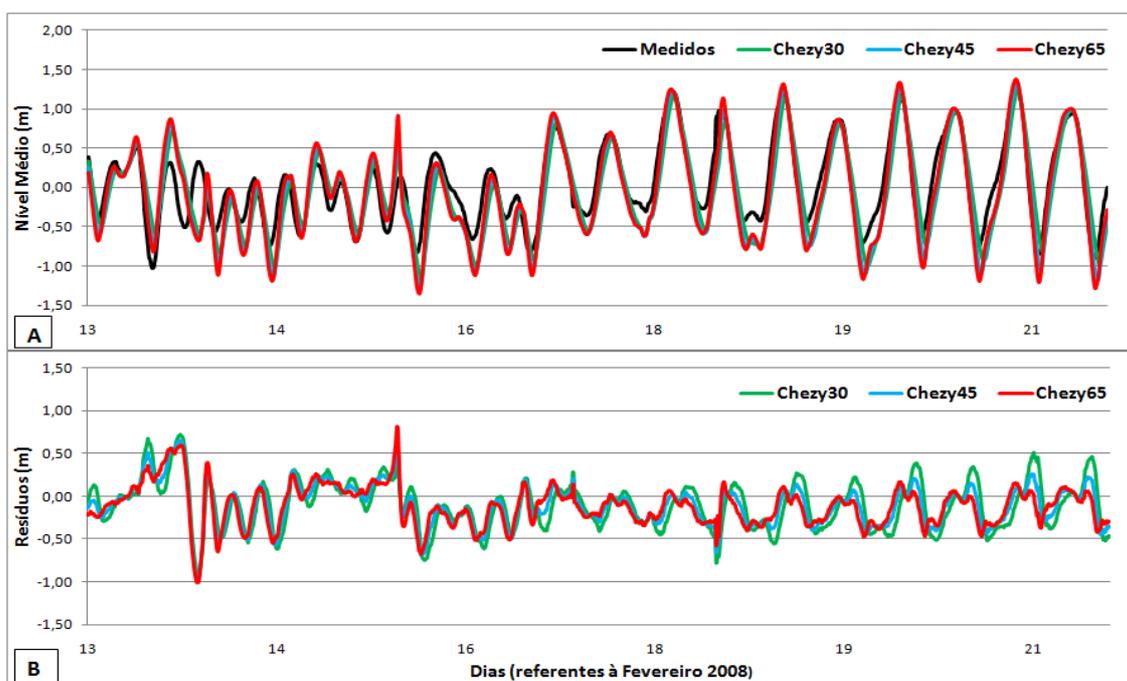


FIGURA 28: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

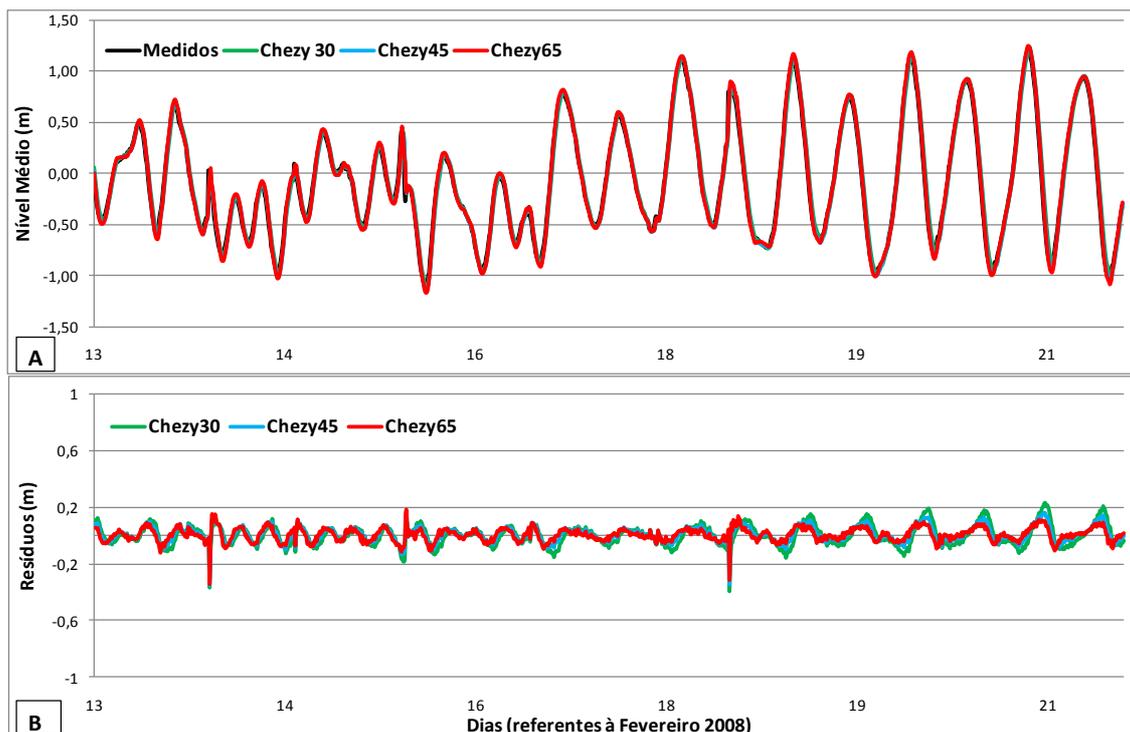


FIGURA 29: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

Os resultados apresentados mostram que, para as duas áreas, os valores de vazão não apresentaram discrepâncias entre os cenários modelados, com exceção do início da série da Ponta do Félix, que apresenta uma discrepância associada ao efeito de inicialização do modelo. Entretanto, os valores residuais dos níveis d'água para o coeficiente de Chezy  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  foram os que apresentaram melhor resultado tanto para o Porto de Paranaguá quanto para a Ponta do Félix, fato que é corroborado através da análise do Erro Médio Quadrático (Tabela 5).

TABELA 5: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS SIMULADOS PARA O NÍVEL D'ÁGUA SEM APORTE DOS RIOS E COM DIFERENTES VALORES DE CHEZY DURANTE O PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ E DA PONTA DO FÉLIX.

Chezy ( $\text{m}^{0,5}\text{s}^{-1}$ )	Erro Quadrático Médio	
	Porto de Paranaguá	Ponta do Félix
30	0,0755	0,2994
45	0,0588	0,2651
65	0,0533	0,2599

Mesmo havendo aparentemente uma grande diferença entre as áreas do Porto de Paranaguá e Ponta do Félix, as diferenças entre os parâmetros dentro de cada área, foi coerente, uma vez que as simulações anteriores com valor de Chezy de  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  apresentaram uma resposta mais precisa em relação aos dados medidos.

Com base neste resultado, foram comparados para este parâmetro (Chezy  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ ) os dados das simulações com e sem a vazão dos rios para a região do Porto de Paranaguá e Ponta do Félix. Os resultados das análises de níveis d'água para esta simulação são apresentados abaixo com análise de resíduos (Figura 30 e 31).

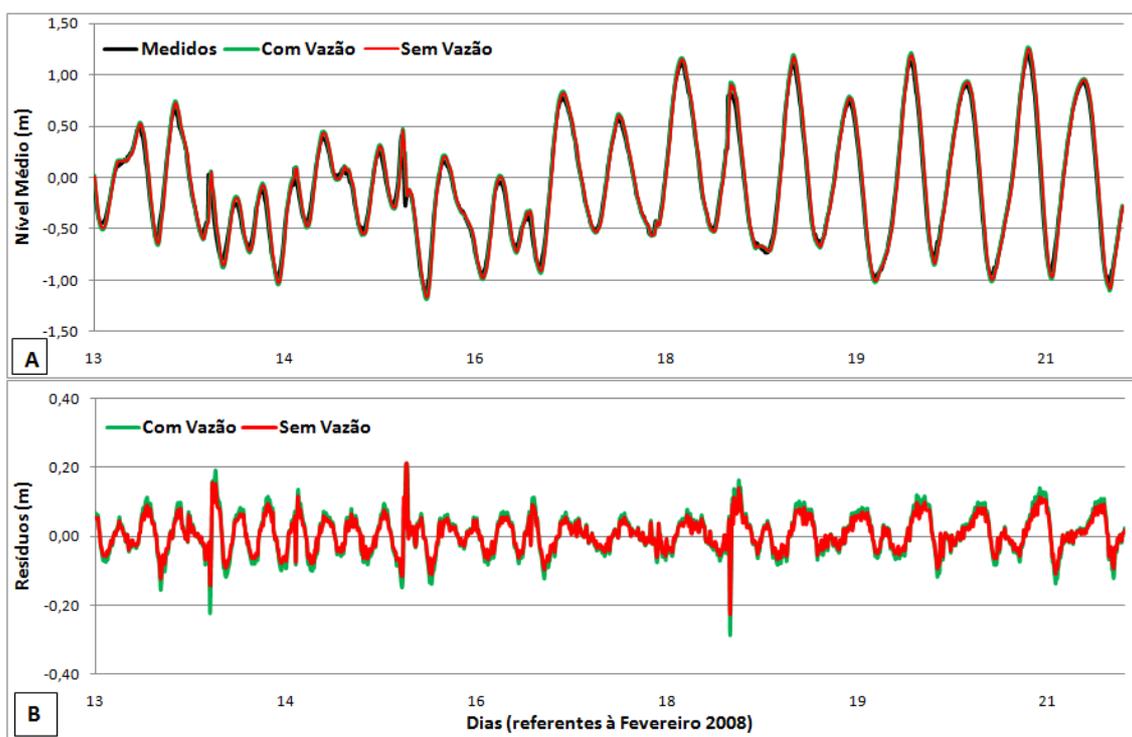


FIGURA 30: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS PARA O CENÁRIO DE CHEZY  $65\text{M}^{0,5}/\text{S}^{-1}$  COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

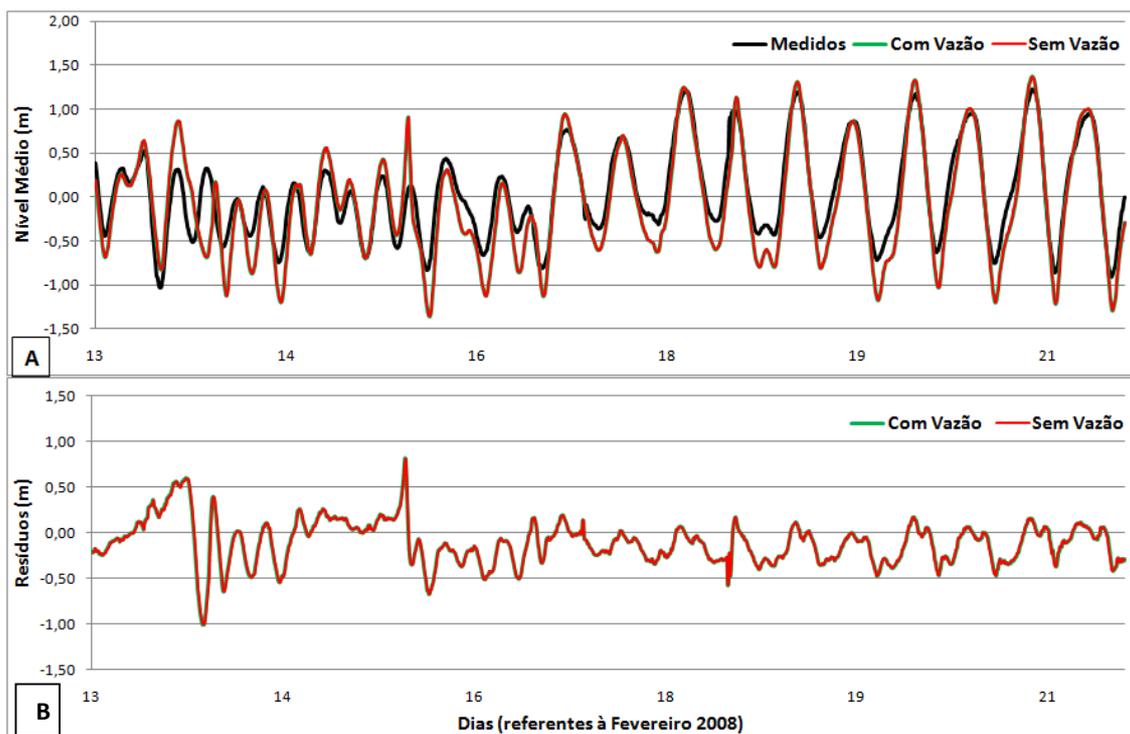


FIGURA 31: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS PARA O CENÁRIO DE CHEZY 65  $M^{0,5}/S^{-1}$  COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX NO PERÍODO DE (13/02/2008-00H00 À 22/02/2008- 00H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

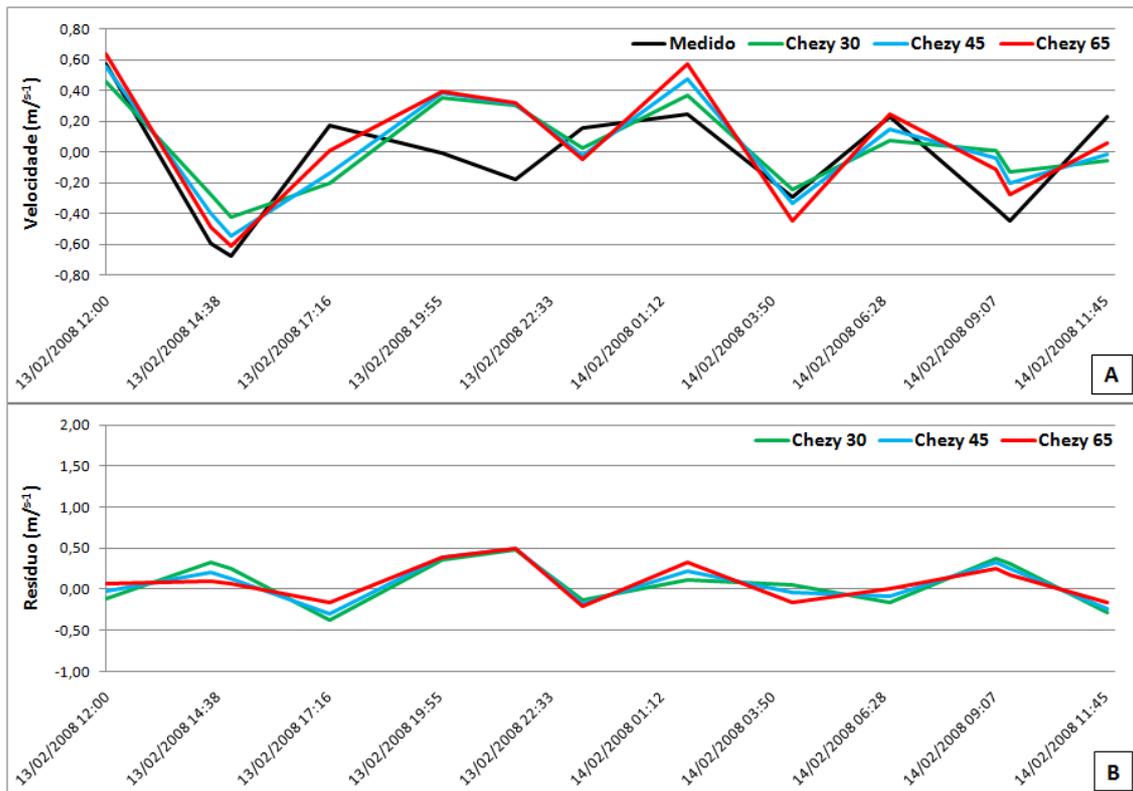
Para os cenários de Chezy  $65m^{0,5}/s^{-1}$  simulados com e sem o aporte fluvial, os resultados apresentaram forte concordância, principalmente para a região da Ponta do Félix. No Porto de Paranaguá, uma pequena diferença nos valores de resíduos, onde os valores simulados com vazão apresentaram pequenas diferenças em amplitude, com valores sutilmente maiores.

Contudo, o que era esperado é que houvesse maior influência do aporte fluvial nos valores de níveis, o que não ocorreu. Este fato pode ser possivelmente explicado devido à apenas sete rios (Sagrado, Rio do Pinto, Marumbi, Nhudiaquara, Nunes, Cacatu e Cachoeira) terem sido incluídos nas simulações, uma vez que essa região possui muitos outros pequenos tributários, que apesar de seus tamanhos reduzidos, se somados podem contribuir fundamentalmente com o aporte de água doce na baía.

Poderia possivelmente haver diferenças significativas também se houvesse alguma maré meteorológica que fosse capaz de represar a

drenagem continental, fato que não foi constatado durante o período de simulação.

Os dados de correntes para a região do Porto de Paranaguá, simulados para os três valores de coeficiente de atrito são apresentados para o período de quadratura (Figura 32) e sizígia (Figura 33).



**FIGURA 32: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS TRÊS VALORES DE CHEZY, NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.**

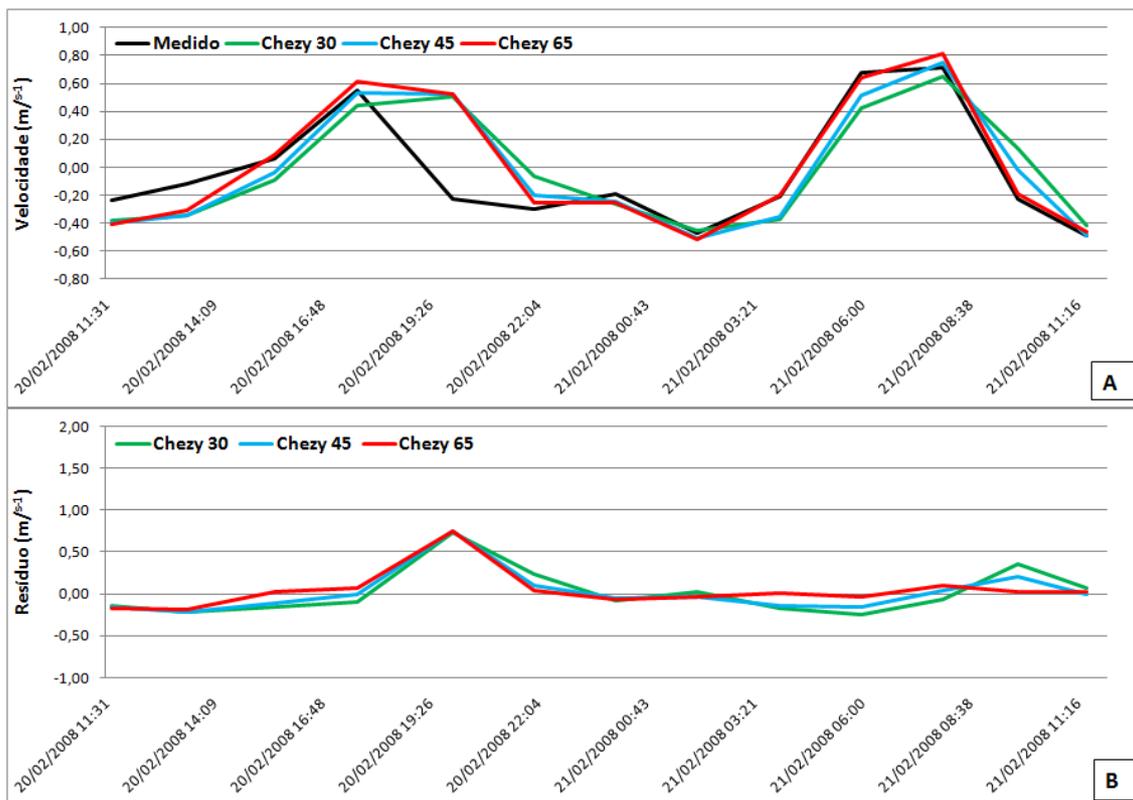


FIGURA 33: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS TRÊS VALORES DE CHEZY, NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

Os valores de velocidade de correntes simulados para cada valor do coeficiente de Chezy apresentaram entre eles, pequenas diferenças de magnitude durante o período de quadratura, e pequenas diferenças de fase durante o período de sizígia. Entretanto, os três valores simulados apresentaram a mesma resultante em relação aos dados medidos.

Essa diferença em magnitude e fase das correntes é justificada possivelmente pela discretização da grade numérica ao utilizar o algoritmo de “Wet and Dry”. Isso ocorre talvez, devido ao fato de que a grade não possui resolução suficiente nas regiões de fluxos dos rios para representar as feições de fundo, o que de acordo com o princípio desse algoritmo irá gerar oscilações de acordo com o tamanho das células da grade (Item 6.2).

O tamanho da célula pode ser muito grande para a região dos rios, o que teria que ser corrigido com o ajuste da resolução da grade nas áreas de

fluxos dos rios e com uma suavização do gradiente de fundo, fazendo com que as velocidades das correntes diminuíssem, por efeito de continuidade.

Outro problema associado a essas diferenças é a batimetria, uma vez que os dados batimétricos das áreas dos rios são de baixa resolução espacial, o que força uma extrapolação dos dados, gerando resultados que muitas vezes não condizem com a condição real do ambiente. Já

Dentre os três valores de coeficiente de Chezy calculados, os valores de  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  foram novamente os que apresentaram os resultados mais próximos dos dados medidos tanto para o período de quadratura quanto de sizígia. Este resultado é corroborado com os cálculos do Erro Médio Quadrático, calculado para os três valores, e apresentado na Tabela 6.

**TABELA 6: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS DE VELOCIDADE DE CORRENTES SIMULADOS SEM APORTE DOS RIOS E COM DIFERENTES VALORES DE CHEZY DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00) E SIZÍGIA (20/02/2008- 11H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ.**

<b>Chezy (<math>\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>Quadratura</b>	<b>Sizígia</b>
<b>30</b>	0,2859	0,2668
<b>45</b>	0,2580	0,2410
<b>65</b>	0,2404	0,2246

Os cálculos dos Erros mostraram valores menores nos erros dos resíduos para os valores de coeficiente de Chezy  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  tanto para sizígia, quanto quadratura, o que confirma a escolha deste valor para a validação do modelo. A partir deste resultado, foi feita a comparação das simulações de correntes para o Porto de Paranaguá com e sem aporte dos rios, apenas para o valor de Chezy  $65\text{m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ . Abaixo são apresentados os resultados, com os valores de níveis residuais para os períodos de quadratura (13/02/2008-12h00 à 14/02/2008- 12h00) (Figura 34) e sizígia (20/02/2008- 11:00 à 21/02/2008-12h00) (Figura 35).

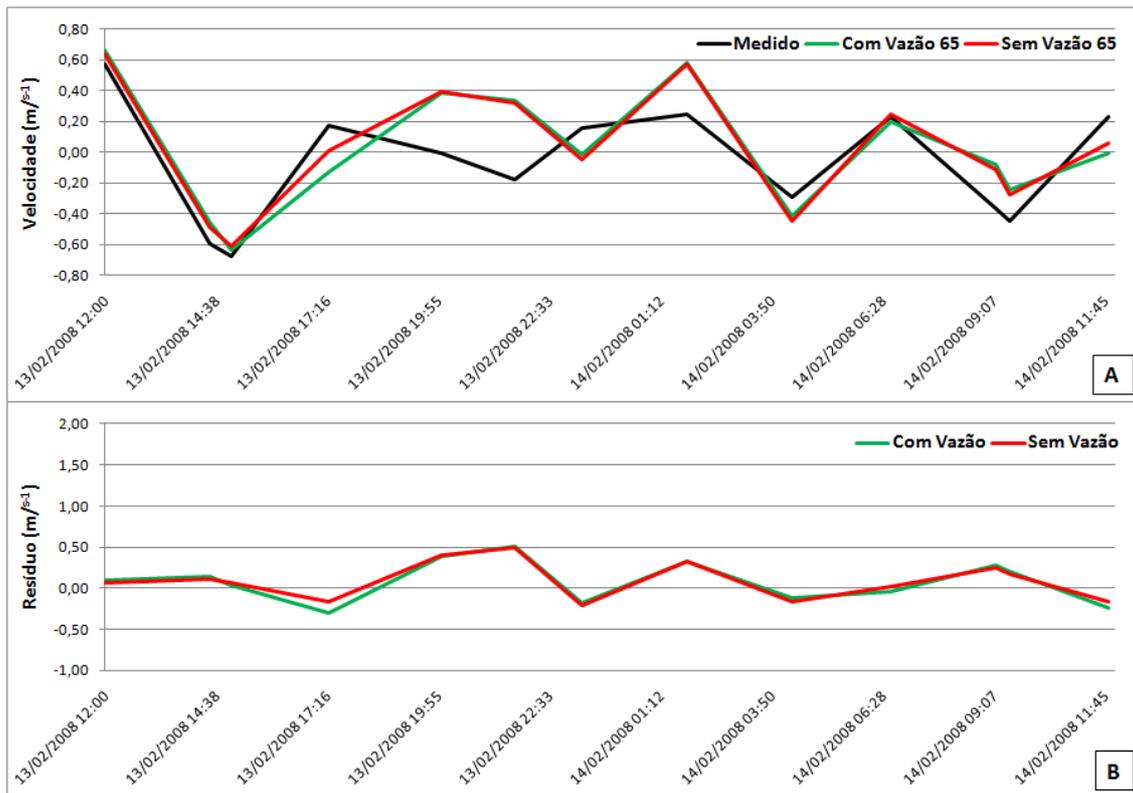


FIGURA 34: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS VALORES DE CHEZY  $65M^{0.5}/S^{-1}$ , NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

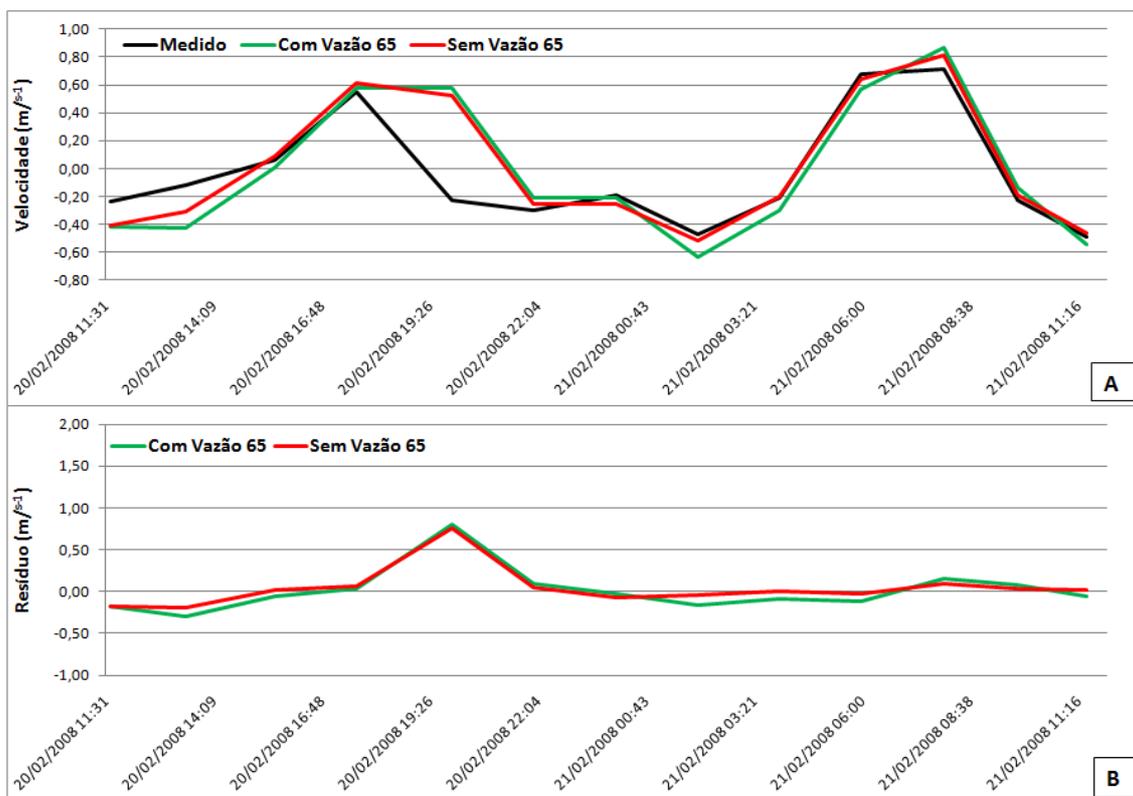


FIGURA 35: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE CORRENTES SIMULADAS COM E SEM APORTE FLUVIAL, PARA OS VALORES DE CHEZY  $65M^{0.5}/S^{-1}$ , NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00). O GRÁFICO B MOSTRA OS VALORES DE RESÍDUOS.

Os resultados mostram que durante o período de quadratura, praticamente não houve nenhuma diferença significativa na variação das correntes, tanto em velocidade como em fase. Já no período de sizígia, os valores simulados apresentaram uma diferença na fase no dia 20 de Fevereiro, entre as 17h00 e 23h00, além de uma diferença em velocidade nos três picos durante este período. Os dados simulados com vazão apresentaram maiores picos de velocidades quando comparados tanto com os dados simulados sem vazão, quanto com os dados medidos. Este comportamento era de se esperar por se tratar de um período de sizígia, onde as correntes normalmente apresentam maiores velocidades.

A tabela de Erros abaixo (Tabela 7), mostra que se comparados os cenários entre as simulações com e sem aporte dos rios, os resultados sem as vazões apresentaram níveis de erros menores (0,2404- Quadratura e 0,2246- sizígia) do que os simulados com aporte dos rios (0,2584- Quadratura e 0,2578 na sizígia). Já, quando comparamos os cenários entre quadratura e sizígia, os resultados mostram que para o segundo caso, os valores foram menores tanto para simulações com vazão (0,2578) quanto para simulações sem vazão (0,2246), enquanto no período de quadratura, os resultados foram 0, 2584 para a simulação com a vazão, e 0, 2404 para a simulação sem a vazão.

**TABELA 7: RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO ENTRE OS NÍVEIS RESIDUAIS DE VELOCIDADE DE CORRENTES SIMULADOS COM E SEM APORTE DOS RIOS PARA VALORES DE CHEZY  $65M^{0,5}/S^{-1}$  DURANTE O PERÍODO DE QUADRATURA (13/02/2008-12H00 À 14/02/2008- 12H00) E SIZÍGIA (20/02/2008-11H00 À 21/02/2008- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DO PARANAGUÁ.**

<b>Chezy <math>65m^{0,5}/s^{-1}</math></b>	<b>Com vazão</b>	<b>Sem vazão</b>
<b>Quadratura</b>	0,2584	0,2404
<b>Sizígia</b>	0,2578	0,2246

## 7.2.6 CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES

Após as análises, onde foram apresentados os resultados comparando os valores utilizados nas simulações, foram definidos os valores dos

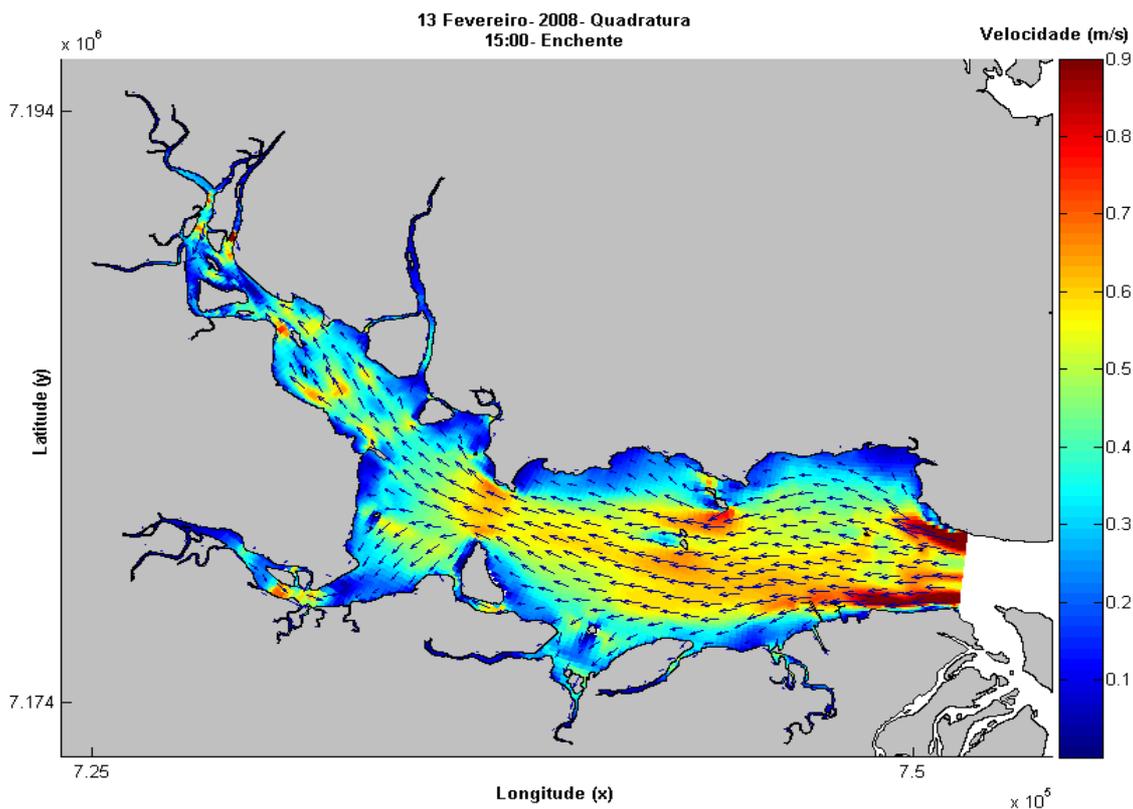
parâmetros físicos e numéricos mais eficientes para o modelo, apresentados na tabela 3 (Item 6.3).

Utilizando esses valores, já plotados acima, são apresentados os mapas de correntes com as velocidades de fluxo nos momentos de máxima enchente e máxima vazante para os períodos de quadratura (Figuras 36 e 37, respectivamente) e sizígia (Figuras 38 e 39, respectivamente).

Analisando os mapas, podemos observar valores superiores de correntes de enchente (Figura 36) chegando a 1,5 m/s principalmente nas regiões de afunilamento da baía. Podemos notar que nesse período as correntes mais fortes foram na região em frente ao Porto de Paranaguá e mais a montante a velocidade torna a intensificar-se um pouco na região de Ilha do Teixeira, atingindo velocidade de 0,7 m/s.

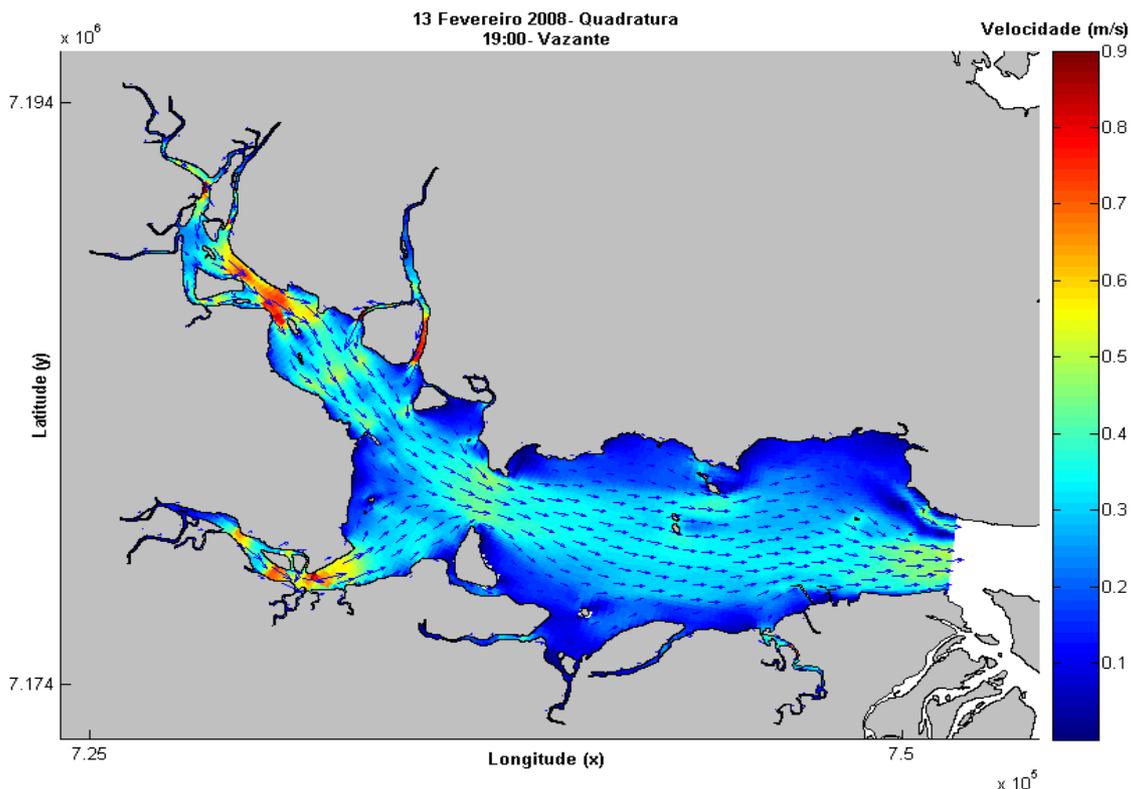
Durante o período de quadratura, o comportamento das correntes pode variar, e isso pode ser explicado possivelmente devido à maior influência das componentes não-lineares da maré.

Para tal afirmação é preciso um estudo mais específico de cada componente da maré, entretanto o que ficou evidente nessas simulações é que diferentemente do período de sizígia, durante a quadratura podem ocorrer algumas situações onde as correntes máximas de enchente superam as máximas de vazante.



**FIGURA 36: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE QUADRATURA (13/02/2008- 15H00).**

Os valores de velocidade das correntes de vazante para o período de quadratura (Figura 37) apresentaram valores máximos de 0,8 m/s nas regiões de desembocadura dos rios que deságuam na baía de Antonina. Vale lembrar que na área das duas desembocaduras estão todos os rios utilizados nesta modelagem, inclusive os principais responsáveis por aporte de água doce na baía, os rios Cachoeira e Nhudiaquara. Já na região do porto de Paranaguá, as correntes apresentaram valores de 0,5 m/s, que são menores do que os valores durante a maré enchente.



**FIGURA 37: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE QUADRATURA (13/02/2008- 19:00).**

Para o período de sizígia, os valores de correntes de vazante (Figura 38) foram maiores, chegando a 1,0 m/s nas áreas de afunilamento da baía e, principalmente na região do Porto de Paranaguá. Na região da Ilha do Teixeira pode-se notar uma intensificação nas velocidades das correntes, chegando a valores 0,75 m/s, principalmente próximo às margens. Na região da desembocadura dos rios Cachoeira e Nhudiaquara, os valores máximos chegaram a 0,85 m/s, evidenciando ainda mais a importância do aporte de água doce que estes rios têm para a baía de Antonina.

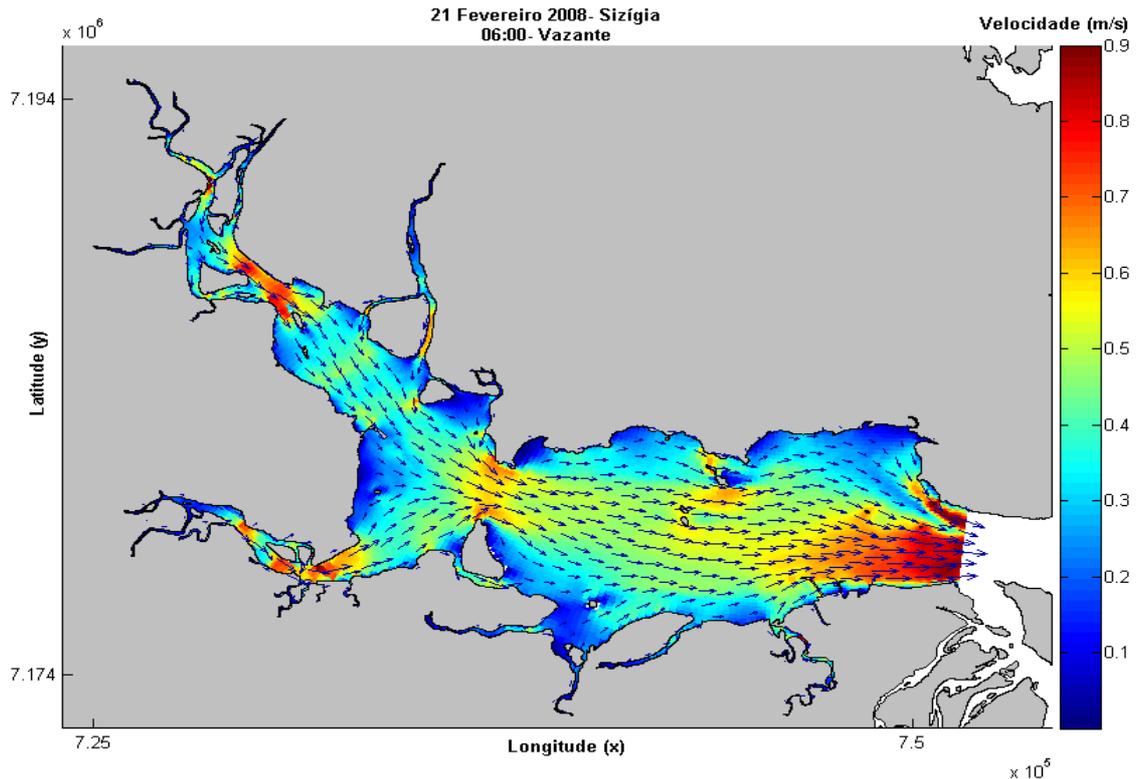


FIGURA 38: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (21/02/2008- 06:00).

Os valores de correntes de enchente (Figura 39) apresentaram valores máximos de 2,5 m/s na região do Porto de Paranaguá, com maiores intensidades na margem norte. Para a região da Ilha do Teixeira, os valores máximos foram de 0,65 m/s. Já na região de desembocadura dos rios, as correntes apresentaram valores baixos sentido estuário acima, próximos de 0,8 m/s, fato possivelmente explicado pela forte influência dos rios.

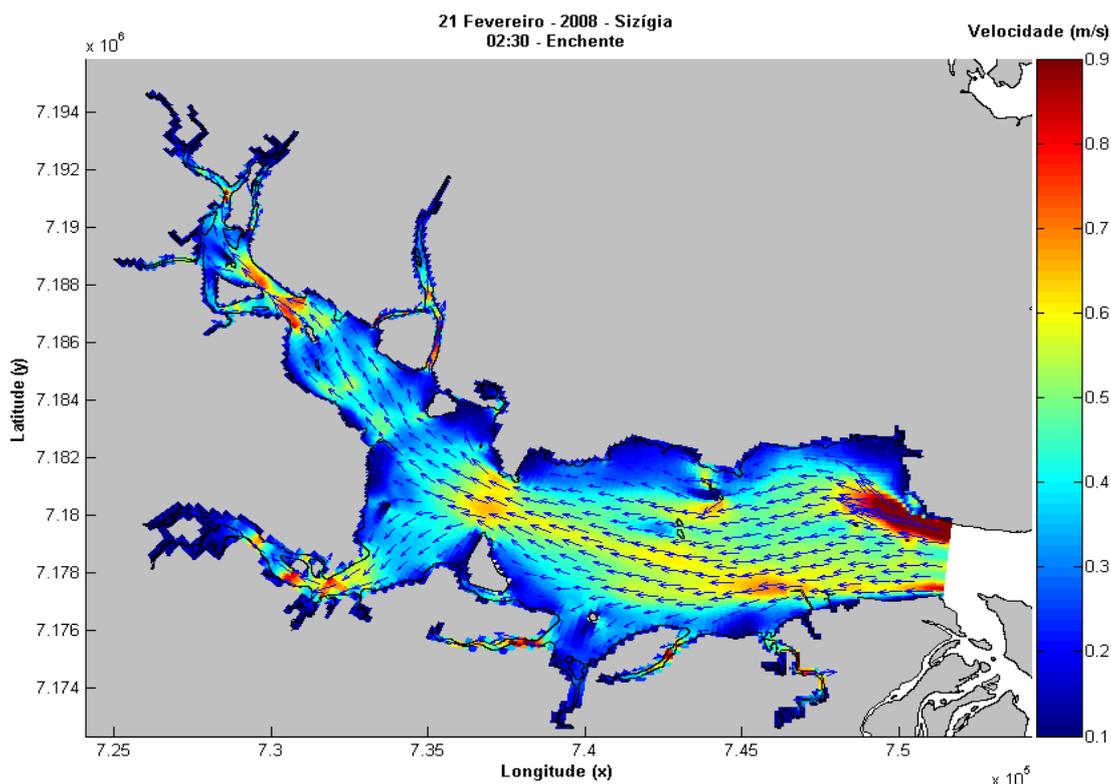


FIGURA 39: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (21/02/2008- 02H30).

### 7.3 VALIDAÇÃO

A fase de validação do modelo é onde se testa as habilidades deste em reproduzir os fenômenos reais. Segundo Tobón (2002) é a fase de documentar a aplicabilidade e precisão dos resultados simulados em relação aos seus propósitos, e do sistema natural que o mesmo representa.

Durante a validação os dados físicos e numéricos utilizados na calibração não devem ser alterados, e os resultados devem ser comparados com dados de campo medidos em períodos diferentes da calibração também.

Segundo Tobón (2002), na validação do modelo devem ser realizadas simulações de longos períodos para avaliar o modelo com respeito aos níveis d'água durante um ciclo completo de maré de sizígia-quadratura. Além disso, devem ser feitas simulações de curto período para avaliar os resultados quanto às magnitudes de correntes e vazão.

Baseado nestas informações, a validação do modelo foi realizada para o período de Setembro de 2007. Os valores de níveis foram simulados para o período de 01/09/2007 à 15/09/2007, enquanto as correntes foram simuladas para o período de sizígia de 11/09/2007 e 12/09/2007, período este onde há medições de correntes na seção transversal em frente ao Porto de Paranaguá.

A seguir, é apresentada uma tabela com todos os parâmetros utilizados na validação (Tabela 8). Os níveis d'água registrados no Porto de Paranaguá, utilizados como condição de contorno durante a validação, e os campos de vento atuantes na região no período da simulação são apresentados nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

TABELA 8: PARÂMETROS FÍSICOS E NUMÉRICOS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DO MODELO.

Parâmetro	Valor
Período de Simulação	01/09/2007 00:00 à 15/09/2007 00:00
Condição inicial	Nível= 0 metros
Condição de Contorno	Séries de níveis de Paranaguá
Passo de tempo	1 minuto
Aceleração da gravidade	$9,81 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Densidade da água	$1015 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Rugosidade de fundo	$\text{Chezy} = 65 \text{ m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}$
Viscosidade turbulenta	$1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Ventos	Valores horários para 01 à 15/09/2007- Estação CEM
Vazão	Médias semanais para Agosto 2007
	Valores diários ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) de 01 à 15/09/2007

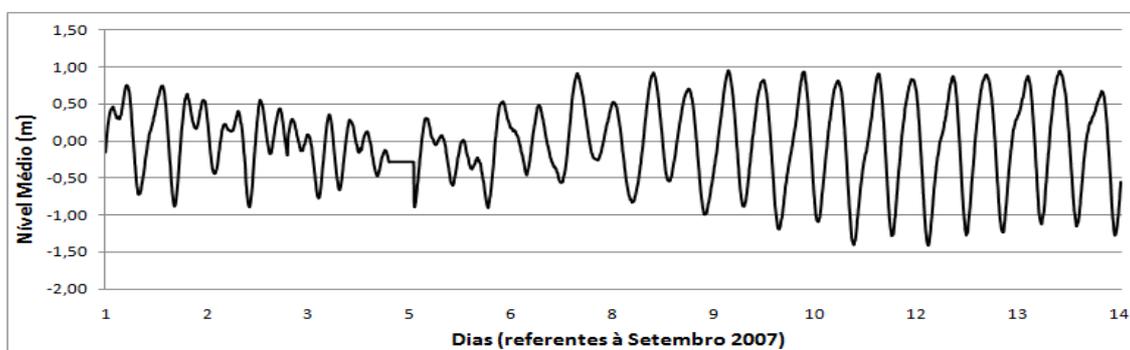


FIGURA 40: NÍVEL MÉDIO DA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ, UTILIZADO COMO CONDIÇÃO DE CONTOURNO NA VALIDAÇÃO DO MODELO (01/09/2007 À 15/09/2007).

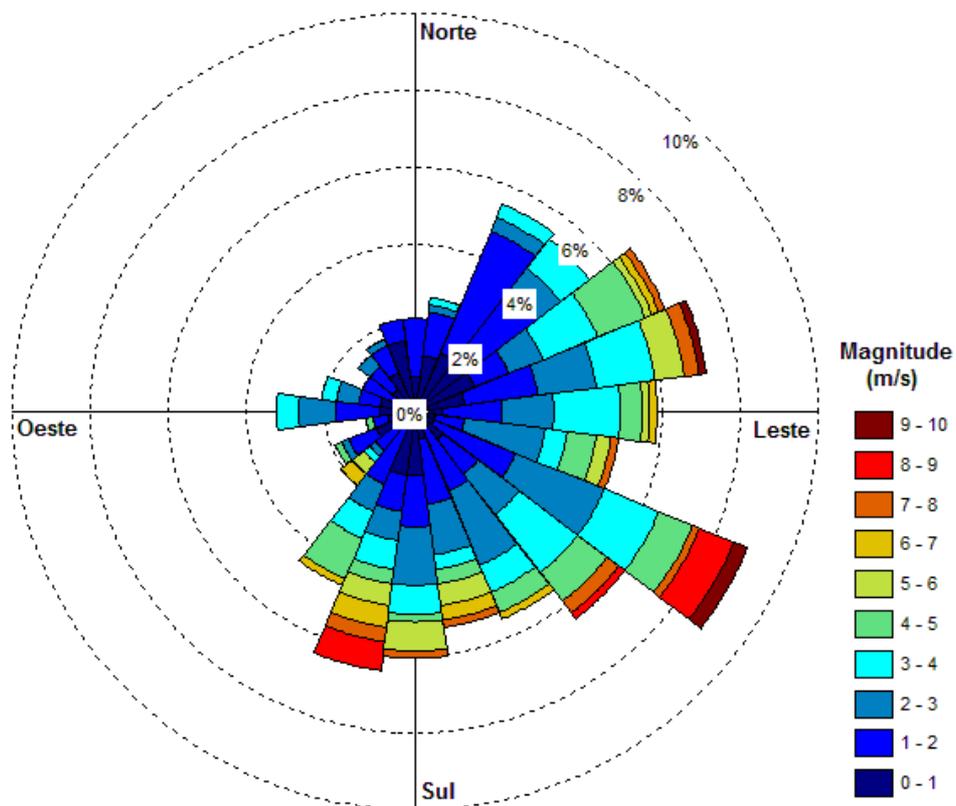


FIGURA 41: DADOS DE INTENSIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTOS DE SETEMBRO DE 2007 DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO CEM UTILIZADOS NO PERÍODO DA VALIDAÇÃO.

Seguindo o método aplicado na calibração, a seguir são apresentados os valores de níveis d'água, com análise de resíduos, gerados durante o período de simulação e comparados com os dados medidos na estação maregráfica da Ponta do Félix (Figura 41).

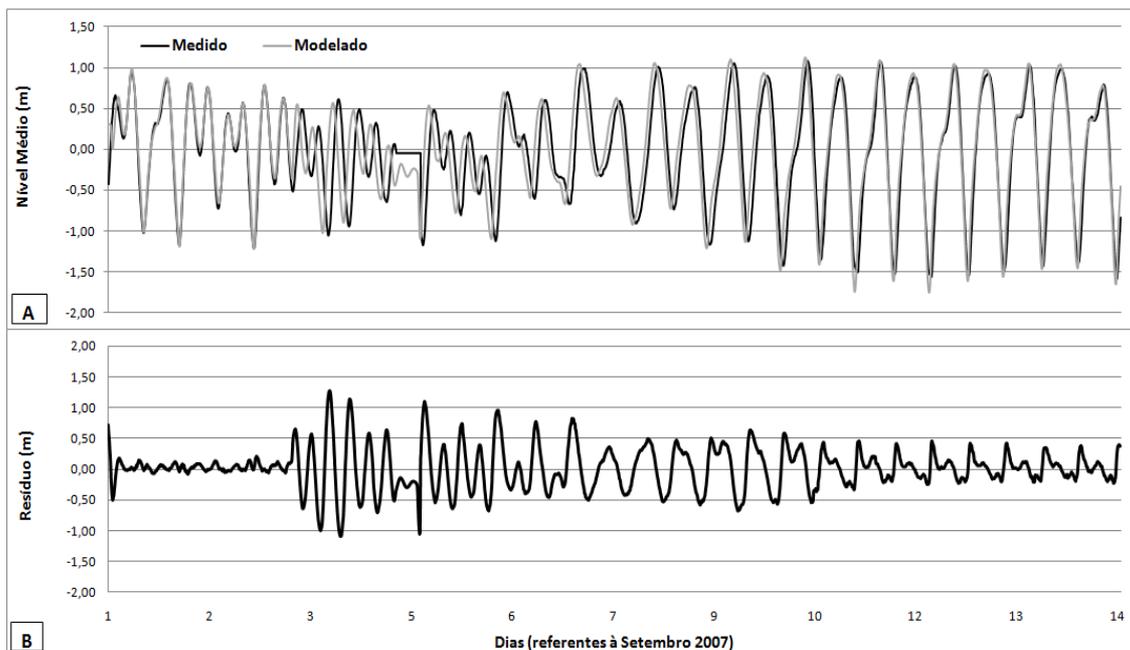


FIGURA 42: COMPARAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA MEDIDOS E MODELADOS DA REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL PARA O PERÍODO DE SIMULAÇÃO.

Os valores de níveis apresentaram uma ótima relação entre os valores medidos e simulados, apresentando uma pequena diferença de fase durante a quadratura. Esta diferença não pode ser explicada com total certeza pois não pode ser atribuída aos efeitos de inicialização, uma vez que a diferença surge no meio da série. Seria necessário um estudo específico para avaliar se há influência de efeitos não-lineares, tratando-se de um período de quadratura.

O valor de desvio padrão foi de 29 cm. O erro apresentado entre os dias 4 e 5 é devido ao fato do equipamento ter parado de funcionar e os dados foram considerados como zero por ser um período pequeno dentro do intervalo.

Os resultados dos testes estatísticos realizados em relação aos níveis residuais gerados para simulação do nível d'água durante o período total de 01/09/2007 à 15/09/2007 e para os períodos de quadratura (01/09/2007 à 07/09/2007) e sizígia (08/09/2007 à 15/09/2007) separados são apresentados na Tabela 9.

TABELA 9: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO PARA NÍVEIS D'ÁGUA DURANTE O PERÍODO DE (01/09/2007- À 15/09/2007) E PARA OS PERÍODOS DE QUADRATURA E SIZÍGIA, PARA A REGIÃO DA PONTA DO FÉLIX.

(m)	Período total (01/09/2007 à 15/09/2007)	Quadratura (01/09/2007 à 07/09/2007)	Sizígia (08/09/2007 à 15/09/2007)
Média	0,0229	0,0194	0,0279
Desv. Padrão	0,2766	0,3984	0,2708
Erro Quadrático	0,2775	0,3987	0,2721

Os desvios padrões apresentaram maiores valores durante o período de quadratura, com valores de 39 cm, enquanto que para o período de sizígia e para o período total, os valores foram bem abaixo, apresentando valores de 27 cm para ambos os casos. Essa diferença mais uma vez é reforçada pelo fato do problema de medição do equipamento, que somado aos valores comumente maiores dos períodos de quadratura, gerou resíduos tão elevados.

Os valores dos erros quadráticos indicam que para o período avaliado as simulações durante as marés de quadratura apresentaram maiores níveis residuais, principalmente durante os eventos de maré baixa. Estes valores mostraram uma defasagem temporal em relação aos dados medidos, o que ficou mais evidente durante o período de quadratura.

Apesar das pequenas diferenças nos resultados da simulação, principalmente durante a maré de quadratura, os níveis gerados pelo modelo foram considerados plenamente satisfatórios para a validação. Entretanto, se faz necessário para estudos futuros, uma melhor avaliação dos resultados, principalmente durante os eventos de maré muito baixa, onde maiores defasagens e níveis residuais foram encontrados.

As velocidades das correntes geradas na simulação e comparadas com as medidas durante o período de sizígia (11/09/2007 16h00 à 12/09/2007 12h00) para a região do Porto de Paranaguá são apresentadas na Figura 43, o gráfico B mostra a análise de níveis residuais.

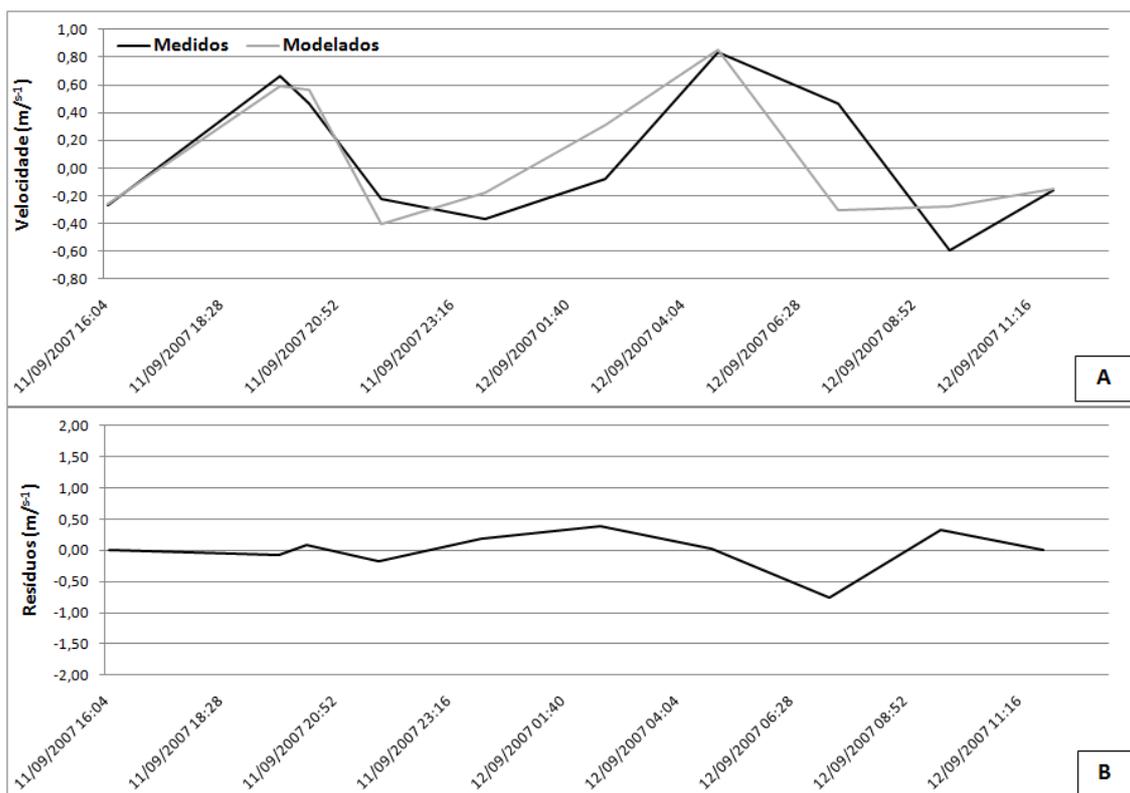


FIGURA 43: COMPARAÇÃO DAS CORRENTES MEDIDAS E MODELADAS DA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ COM ANÁLISE DE NÍVEL RESIDUAL PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 16H00 À 12/09/2007- 12H00).

As correntes medidas no ponto de monitoramento do Porto de Paranaguá apresentaram velocidade máxima de 0,83 m/s. Já os valores gerados na simulação foram máximos de 0,85 m/s. Pode-se observar que os valores gerados pelo modelo foram coerentes com os valores medidos durante um período de 20 horas.

Os dados simulados apresentaram uma pequena defasagem temporal, novamente durante os períodos de maré baixa, onde há uma maior complexidade dos efeitos de atrito com o fundo e interação entre as componentes não-lineares da maré. Os níveis residuais apresentaram valores próximos a 0 m/s no início da série, e mantiveram valores abaixo de 0,50 m/s no restante do período, com um pico de -0,70 m/s durante a maré baixa, como mostrado na Tabela 10.

**TABELA 80: RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS RESIDUAIS GERADOS PELO MODELO PARA VELOCIDADE DAS CORRENTES DURANTE O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 16H00 À 12/09/2007- 12H00) PARA A REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ.**

(m/s)	Teste Estatístico
<b>Média</b>	0,0926
<b>Desv. Padrão</b>	0,3208
<b>Erro Quadrático</b>	0,3043

Os campos de correntes mostram que para a maré de sizígia, os valores das correntes de vazante (Figura 44) apresentaram valores de 0,9 m/s na região da frente do porto de Paranaguá. Já na região da Ilha do Teixeira e Ponta do Félix, os valores chegaram às máximas de 0,85 m/s e 0,65 m/s respectivamente. Podemos observar visualmente fluxos intensos ao longo de todo o canal e nas desembocaduras dos rios. Este fato mostra que mesmo em períodos considerados “secos”, a influência dos tributários de água doce é importante na dinâmica das correntes dessa área

Já para as correntes de enchente (Figura 45), os valores atingiram as máximas de 0,60 m/s na região do porto de Paranaguá. Para as regiões da Ilha do Teixeira e Ponta do Félix, os valores foram respectivamente 0,45 m/s e 0,25 m/s. Podemos observar nesta figura que, apesar de ser período de enchente, nas áreas de desembocadura dos rios Cachoeira e Nhudiaquara os fluxos resultantes são de vazante.

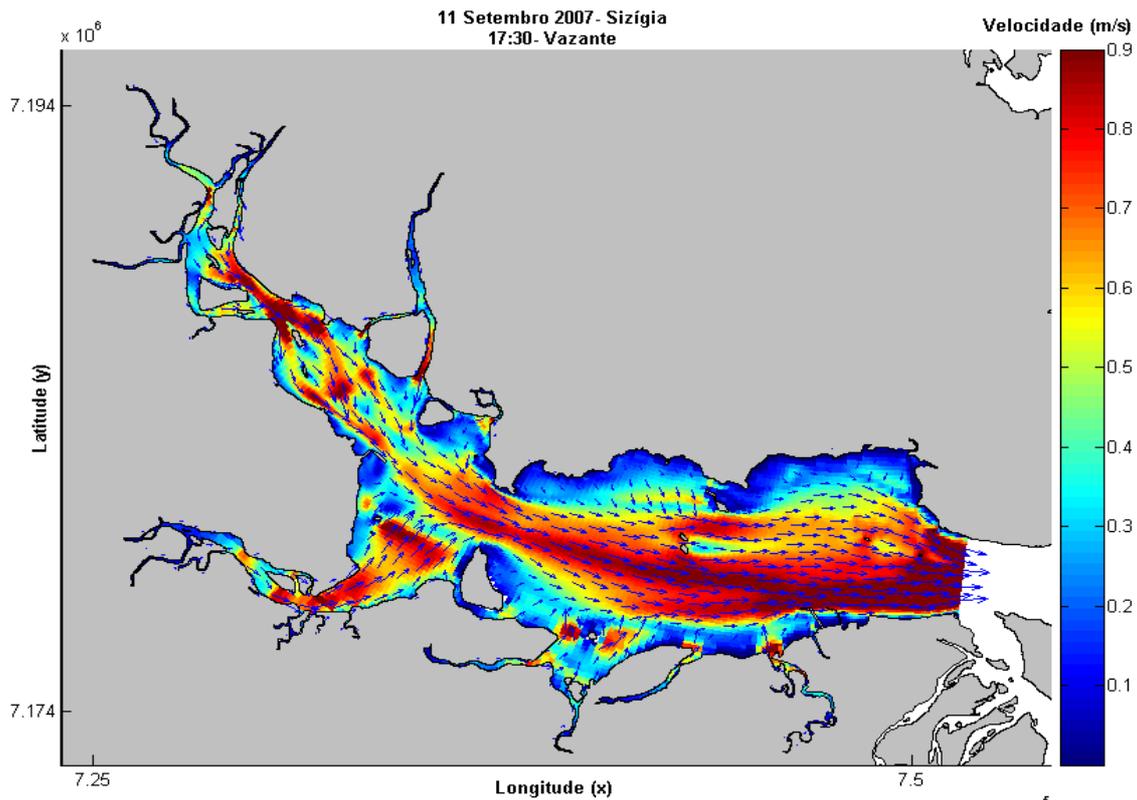


FIGURA 44: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE VAZANTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (11/09/2007- 17H30).

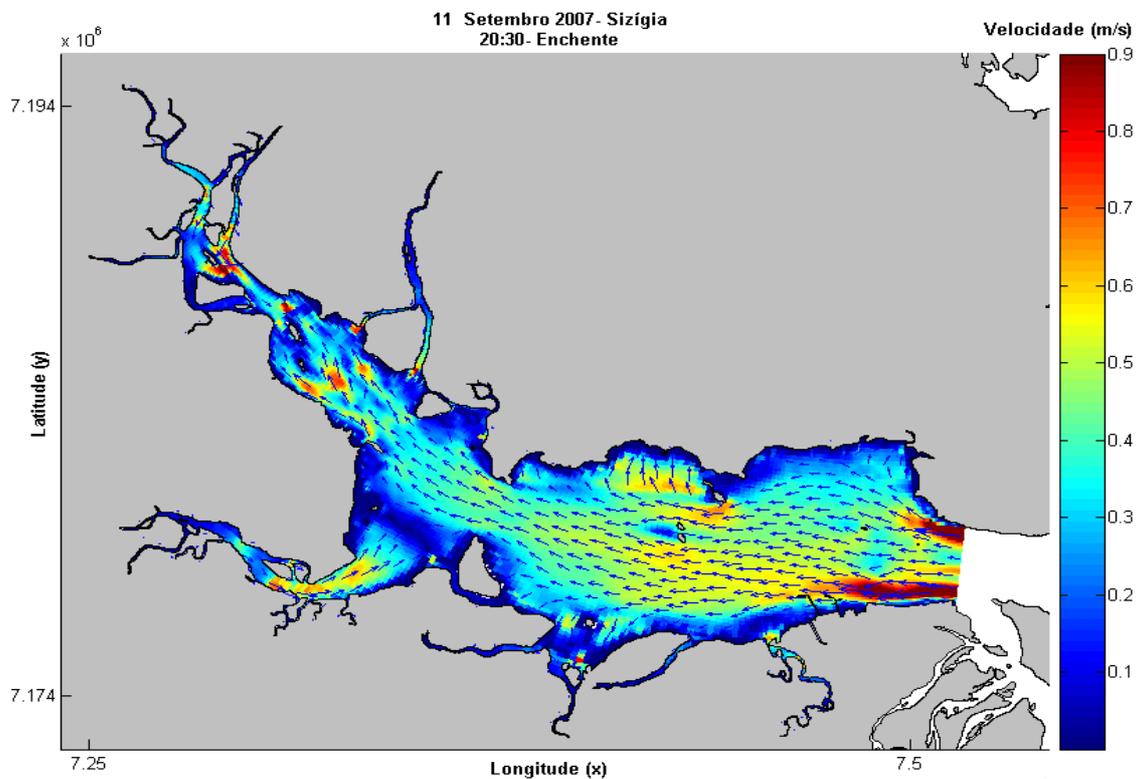


FIGURA 45: VELOCIDADE MÉDIA INTEGRADA NA VERTICAL DAS CORRENTES MÁXIMAS DE ENCHENTE DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (11/09/2007- 20H30).

A seguir serão apresentados mapas dos vetores de intensidades de correntes na profundidade média para períodos em que a maré enche e vaza, visando a caracterização dos movimentos das correntes durante esses períodos tanto para maré de sizígia quanto de quadratura. Foi selecionada uma seção em frente ao porto de Paranaguá, devido a sua importância na navegação de grandes navios e por ser uma região com uma hidrodinâmica complexa, de afunilamento e alargamento do canal.

Essas características morfológicas podem gerar áreas com vórtices turbulentos devido à interação das correntes de enchente e vazante que agem muitas vezes simultaneamente. Esses vórtices turbulentos podem gerar diferentes áreas de erosão e deposição próximas uma das outras, o que será discutido através destes mapas.

Os mapas são apresentados através de oito momentos ao longo de um ciclo de maré, apontando os momentos de viradas da maré. O campo de vetores mostra os canais preferenciais de enchente e vazante, e as áreas com a direção dos fluxos predominantes.

Foram simuladas também duas seções transversais nesta região, para comparação do comportamento das correntes. A primeira foi simulada na parte mais larga dessa área, que compreende o meio da enseada até a margem norte, já a segunda foi feita no “funil” mais a jusante, onde as correntes tendem a ganhar velocidade, devido à diferença da largura do canal. A localização exata das seções transversais criadas são apresentadas na Figura 46.

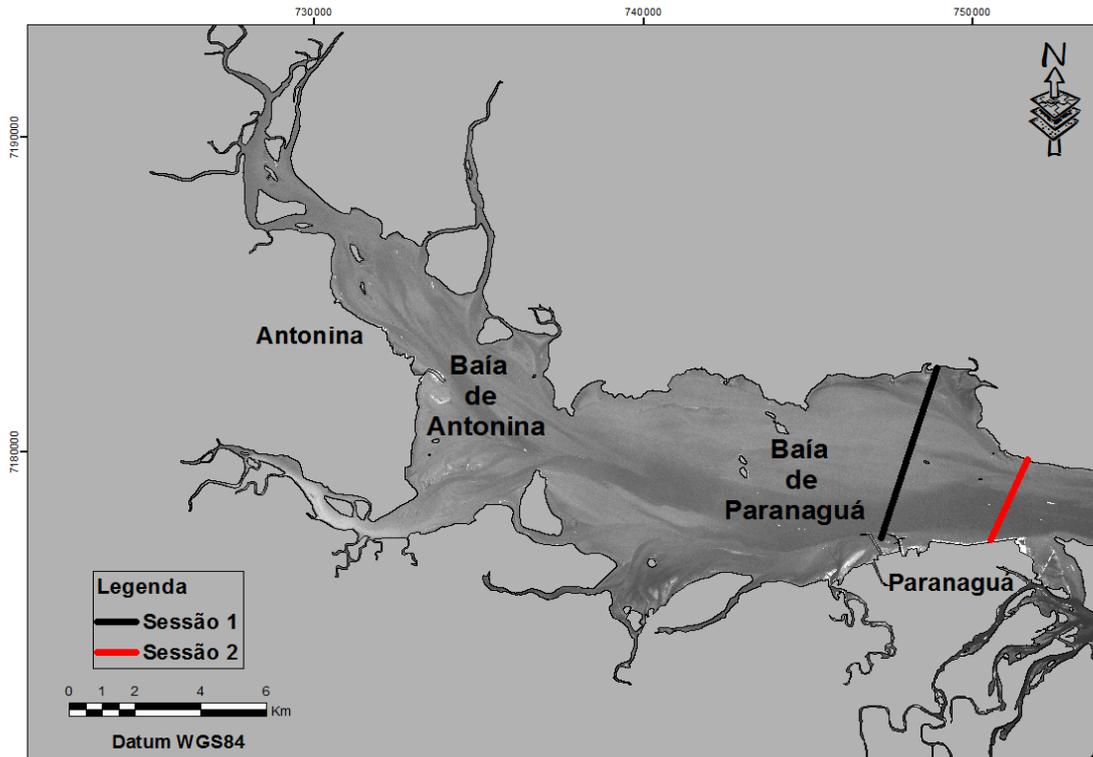
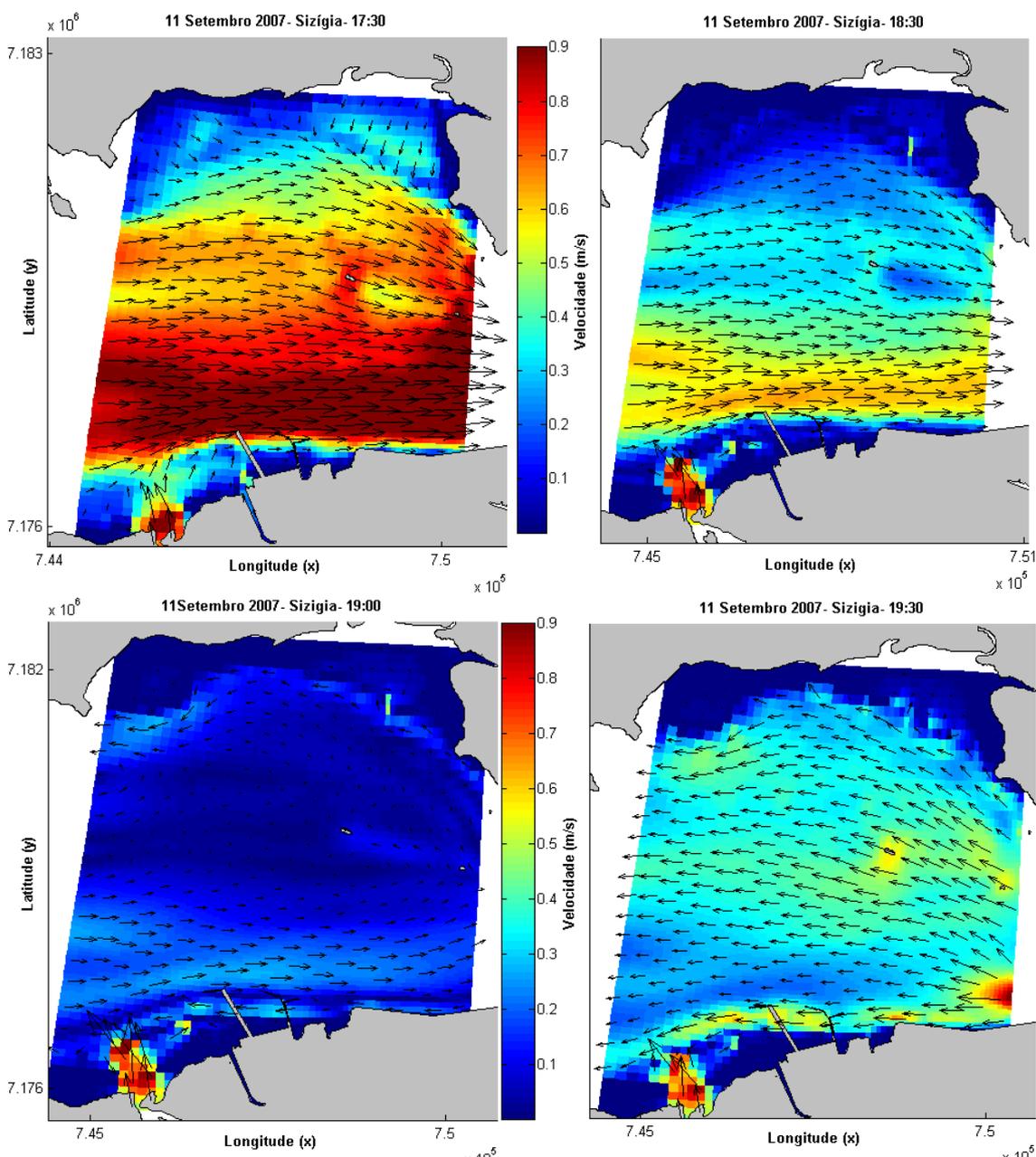


FIGURA 46: MAPA INDICANDO A LOCALIZAÇÃO EXATA DAS DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS CRIADAS PARA MONITORAMENTO DAS CORRENTES.

A figura 47 mostra, durante uma maré de sizígia, o período de vazante onde os quatro cenários seguintes (17h30, 18h30, 19h00 e 19h30) apresentam a inversão da maré até o momento exato em que ela vira para enchente.



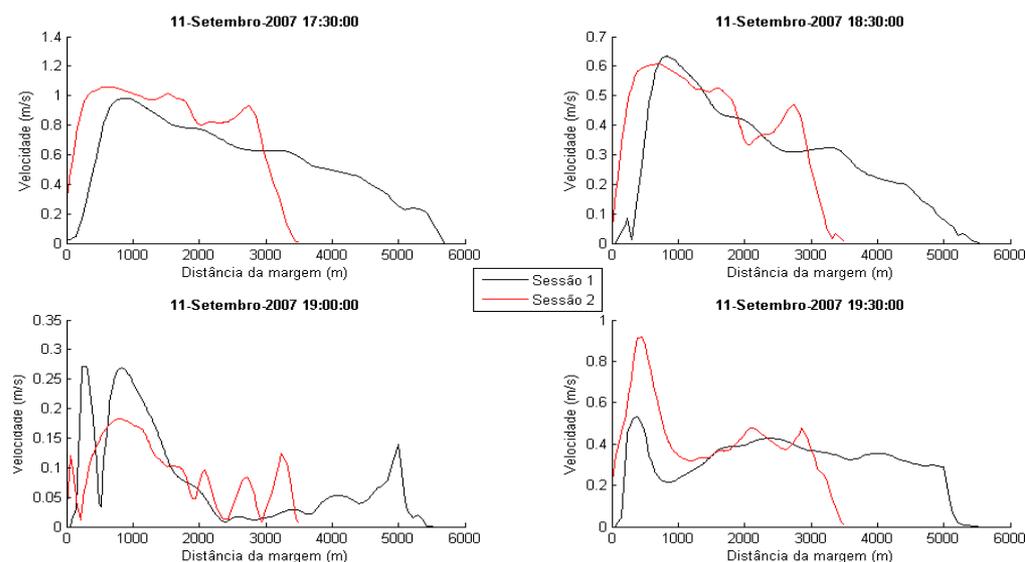
**FIGURA 47: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (11/09/2007- 17H30 À 12/09/2007- 19H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE VAZANTE PARA ENCHENTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.**

Podemos notar claramente que no primeiro cenário a maré vaza com altas velocidades principalmente pela margem sul, onde alcança valores máximos 0,9 m/s, e que segundo Noernberg (2001) é um canal predominante de vazante. Nota-se que as velocidades são intensas em praticamente todo o canal, com exceção da enseada localizada na margem norte, onde as correntes não ultrapassam valores de 0,2 m/s. Segundo Sá (2003), essa região apesar de estar localizada na margem oposta ao porto, concentra valores

elevados de Arsênio, provenientes possivelmente dos esgotos domésticos da cidade de Paranaguá. Este local pode ser claramente um ambiente de forte característica deposicional. Cazati (prep.) caracterizou ao longo de vários ciclos de maré, a transparência da água através de observações com disco de Secchi, sendo que essa região apresentou as maiores concentrações de Material Particulado em Suspensão do eixo Leste-Oeste.

Nos cenários que se seguem, as velocidades de correntes de vazante tendem a diminuir, até atingirem o período de estofa da maré (por volta das 19h00), e inverterem novamente, voltando ao sentido a montante do canal após o período de 2 horas. Esse comportamento é típico de um período de maré de sizígia, onde as variações do nível do mar, e as velocidades de correntes não sofrem tantas oscilações perceptíveis.

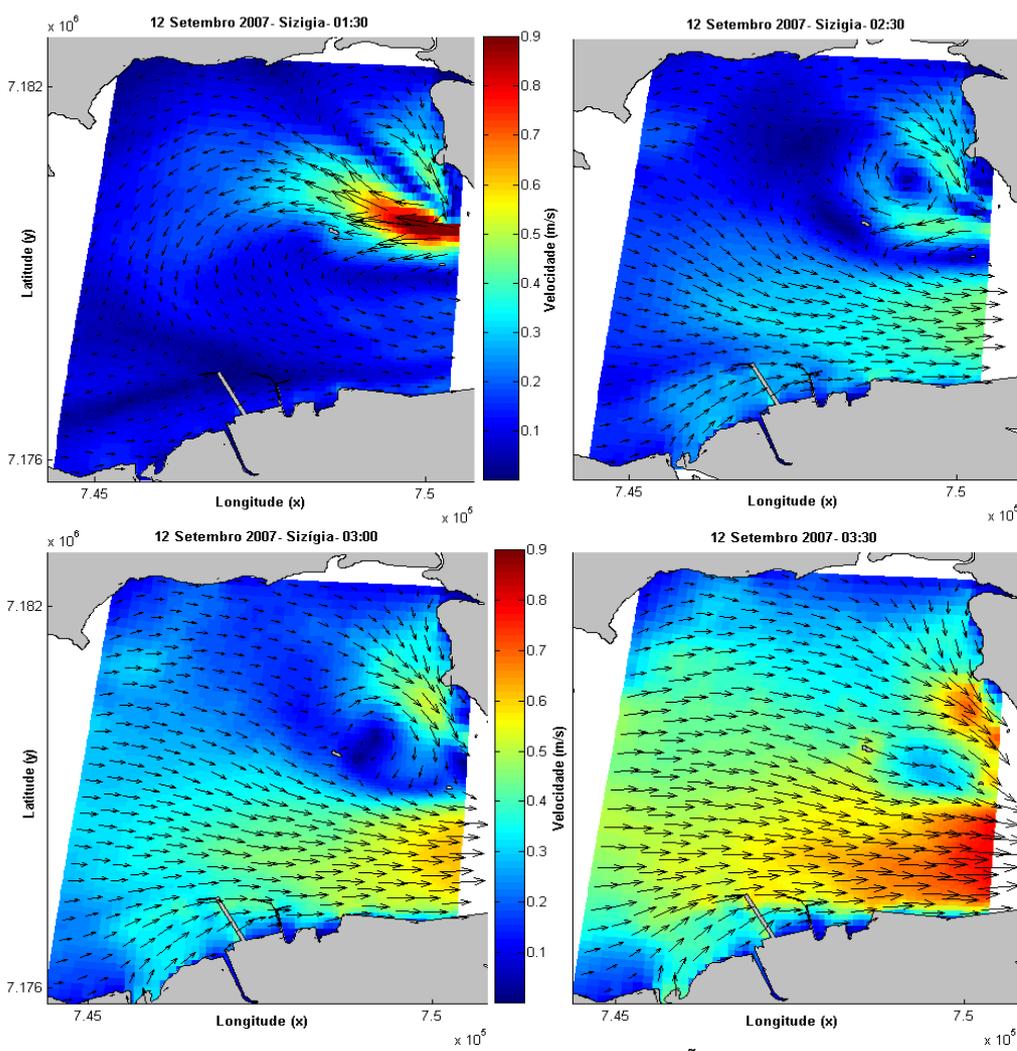
Os gráficos com o perfil das correntes ao longo das duas secções transversais do canal, representando os cenários no mesmo horário dos mapas, são apresentados na Figura 48. O zero do eixo X corresponde à margem sul do canal (margem do Porto de Paranaguá).



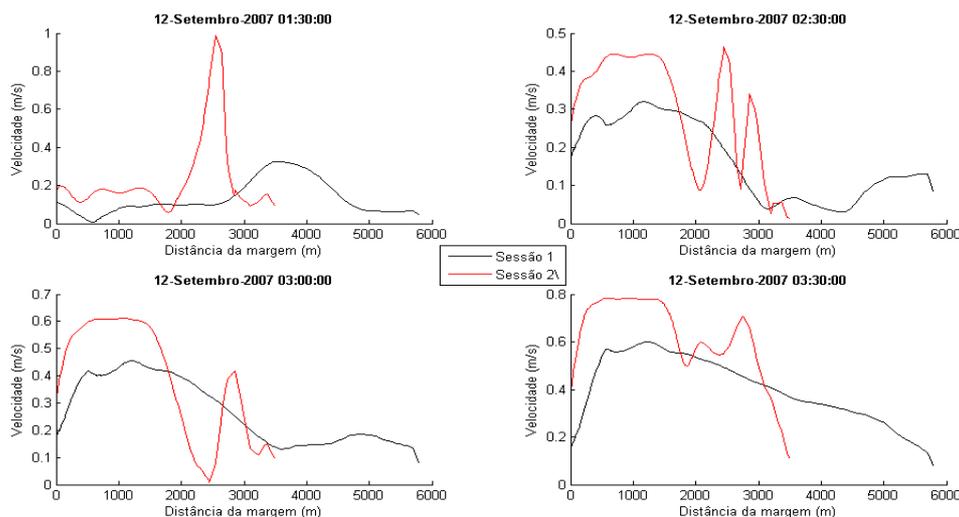
**FIGURA 48: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 47.**

Nestes mapas são observadas as velocidades das correntes posicionadas ao longo da secção transversal do canal. Percebe-se que há uma

predominância do fluxo de vazante pela margem sul, onde os valores de velocidades de correntes apresentaram-se mais elevadas em comparação ao restante do perfil durante os quatro cenários. No momento das 19h00 pode-se perceber que enquanto na margem sul, a água ainda segue o fluxo em direção a desembocadura, na margem norte, há uma intensificação das correntes em direção a cabeceira do estuário, evidenciando que a água a montante da baía não vaza por completo durante um ciclo de maré vazante, gerando uma heterogeneidade lateral. Já no momento das 19h30, o canal volta a apresentar um fluxo de enchente em toda a secção, porém com valores mais elevados na margem sul. O comportamento das velocidades de correntes nessa margem é explicado pelo fato de ser a margem onde se localiza o canal de navegação e, com profundidades maiores, os fluxos tendem a serem mais rápidos.



**FIGURA 49: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE SIZÍGIA (12/09/2007- 01H30 À 12/09/2007- 03H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE ENCHENTE PARA VAZANTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.**



**FIGURA 50: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SECÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 49.**

Neste cenário (Figuras 49 e 50) foi simulado o momento contrário, sendo o estófo da preamar. Podemos perceber que no primeiro momento (01h30) há uma intensa corrente de enchente na margem norte, evidenciada pelas velocidades apresentadas na figura 50, principalmente na secção 2, onde o canal é mais estreito. A partir do próximo momento (02h30) a interação entre as águas continentais que seguem estuário abaixo e as águas que vem do oceano, além da morfologia do local, começam a forçar o aparecimento de vórtices na margem norte. Esses vórtices podem indicar processos de mistura nessa região.

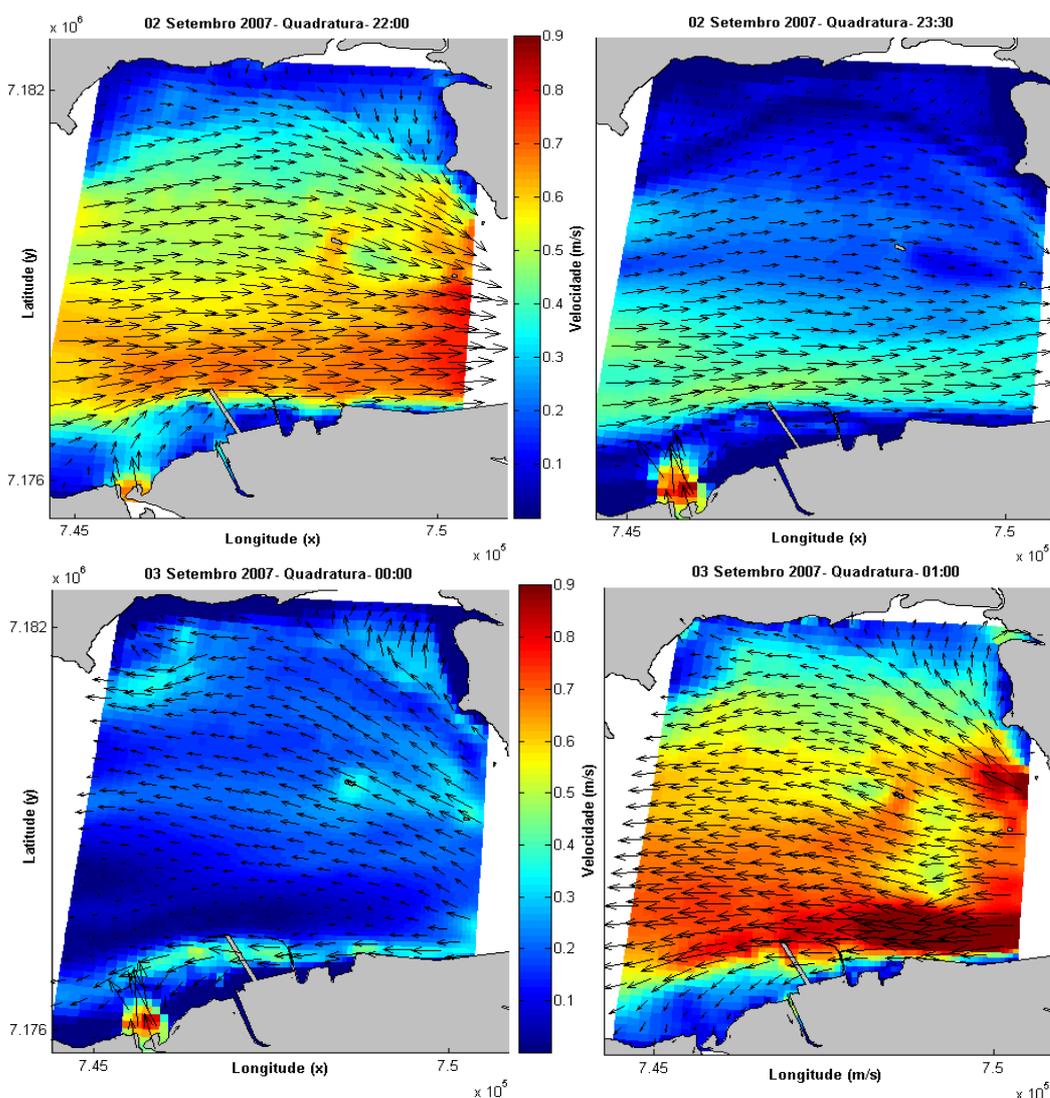
O gráfico dos perfis de correntes mostra que uma parte das correntes segue em direção a margem norte, formando um vórtice no sentido horário, enquanto outra parte segue em direção ao canal de navegação, voltando em direção a desembocadura novamente. Percebe-se ainda que no momento das 02h30 as velocidades da secção 2 na margem norte são ligeiramente superiores as da margem sul.

O que podemos perceber durante esse período de sizígia, são as formações de vórtices entre a região do “funil” do porto, e a enseada localizada a montante. Nota-se que durante o período de sizígia, o canal funciona como uma barreira hidráulica para a enseada, fazendo com que haja

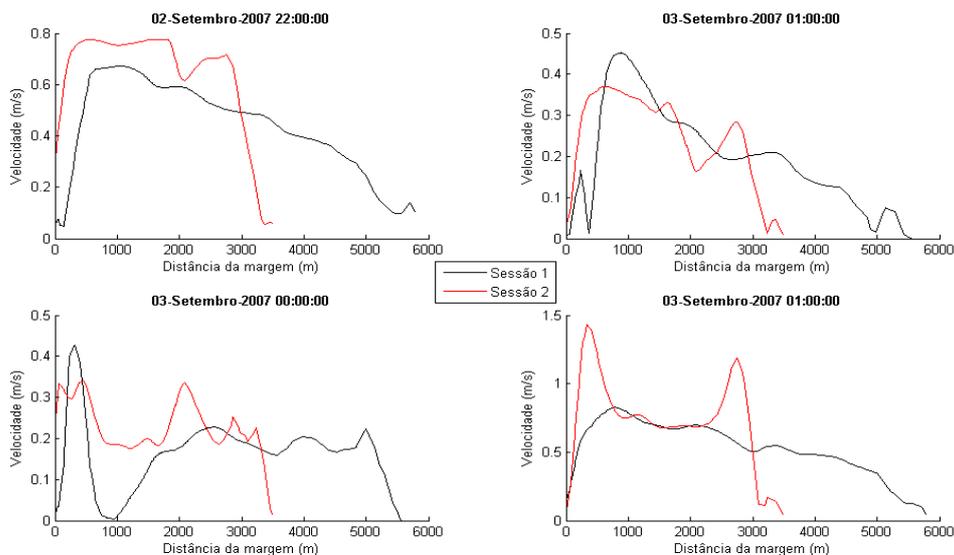
baixa circulação nessa região. Uma situação como essa pode ser responsável por uma maior concentração de Material Particulado em Suspensão.

Por outro lado, com correntes menos intensas, essa barreira hidráulica é menos evidente e a água tende a vazar pela região de afunilamento do canal, fato este que pode contribuir com a formação dos vórtices, já que esse fluxo vai de encontro ao canal de enchente citado anteriormente.

Os mapas para o período de quadratura durante o estófo de baixamar são apresentados na Figura 51.



**FIGURA 51: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (02/09/2007 - 22H00 À 03/09/2007 - 01H00) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE VAZANTE PARA ENCHENTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.**

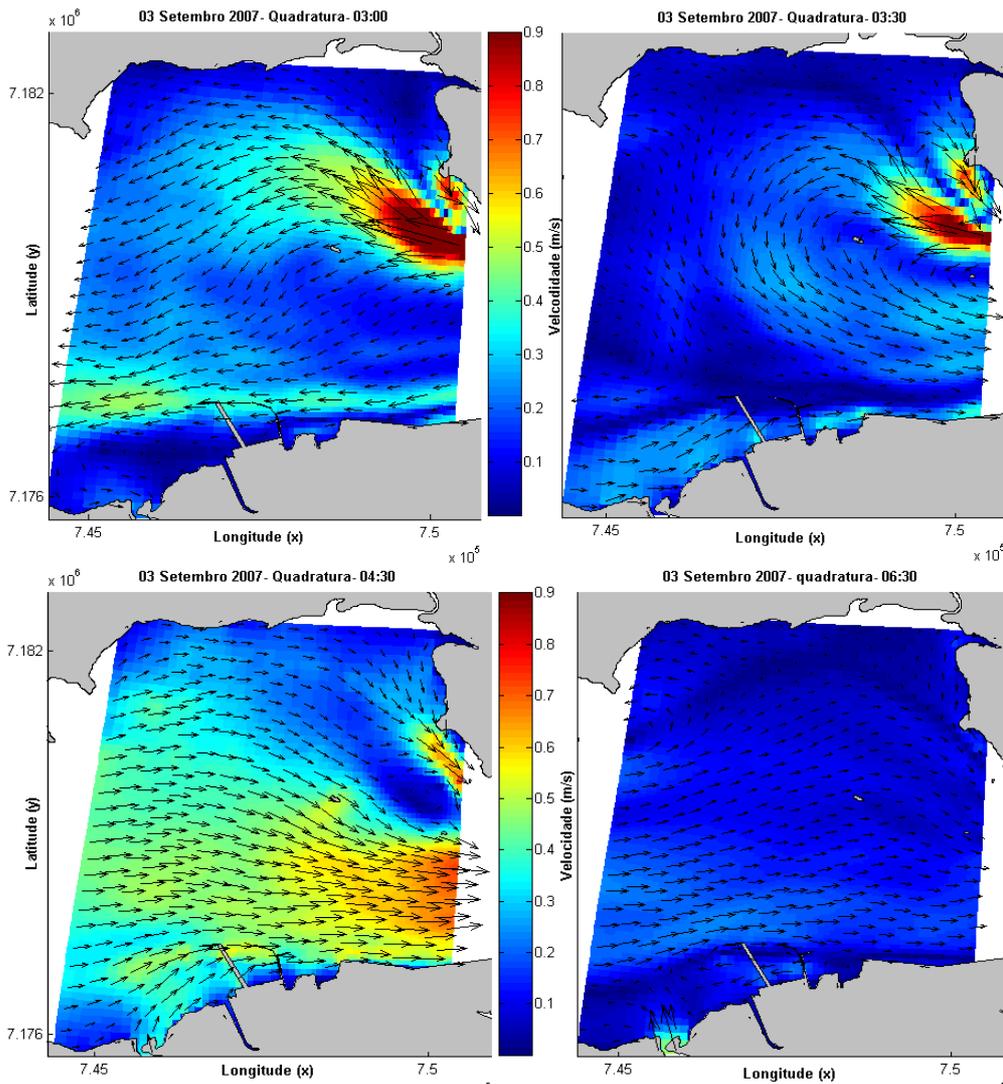


**FIGURA 52: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SEÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 51.**

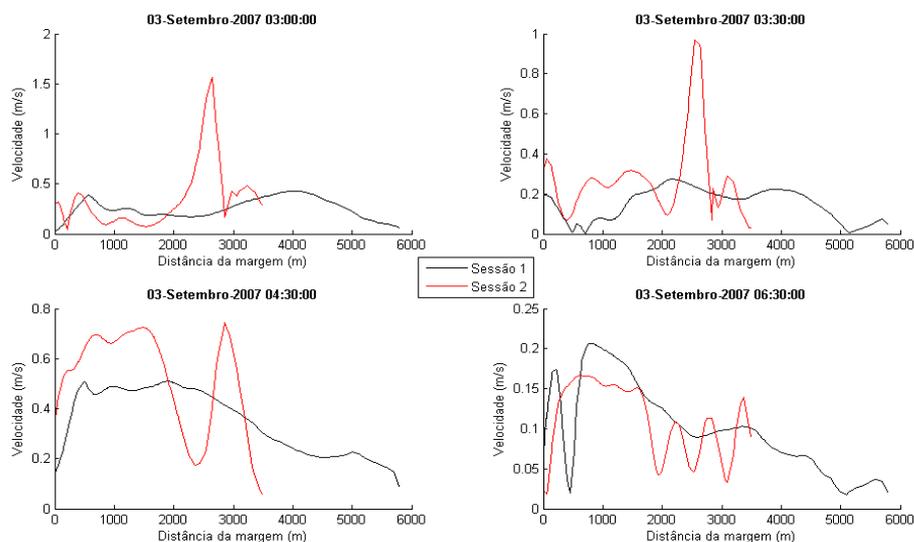
Essa primeira simulação foi feita para o período de estofa de baixamar. O que podemos perceber é que durante o período da quadratura o momento de inversão da maré ocorre mais rápido do que durante a sizígia, e que os períodos tanto de enchente quanto de vazante são menores.

Essa característica deve-se possivelmente devido às interações das componentes de maré com o fundo e com elas mesmas. O aumento destas interações potencializa os efeitos não-lineares das componentes de maré, que por sua vez são responsáveis por efeitos como o de duplicação das preamares (MARONE, 1991). Neste período observaram-se também os maiores valores de velocidades de correntes, que ocorreram durante o período de enchente, e atingiram valores de 1,5 m/s na secção 2.

Um fato interessante ocorreu durante o período de 01h00, onde as fortes correntes de enchente apresentaram valores mais elevados nas duas margens (em torno de 1,4m/s e 1,5m/s), enquanto no canal de navegação as velocidades não ultrapassaram as máximas de 1m/s. Esta situação pode ser atribuída a localização dos canais preferenciais de enchente e vazante, paralelos ao canal de navegação.



**FIGURA 53: MAPA DE CORRENTES COM VETORES DE DIREÇÃO E INTENSIDADE SIMULADOS PARA O PERÍODO DE QUADRATURA (03/09/2007- 03H00 À 03/09/2007- 06H30) MOSTRANDO O MOMENTO EM QUE A MARÉ PASSA DE ENCHENTE PARA VAZANTE NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ. A BARRA DE ESCALAS (VELOCIDADE M/S) CORRESPONDE A TODOS OS QUATRO CENÁRIOS.**



**FIGURA 54: PERFIL DAS CORRENTES AO LONGO DE DUAS SEÇÕES TRANSVERSAIS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ CORRESPONDENTE AO PERÍODO DOS MAPAS DA FIGURA 53.**

Este último período de simulação compreende um momento de estofa de preamar. Nota-se no primeiro momento (03h00) que há novamente a formação dos vórtices turbulentos na margem norte (Figura 53).

Contudo, nesta situação é preciso salientar que os valores de velocidade gerados nesse momento estão acima do esperado. Muito provavelmente seja esta uma instabilidade gerada pelo modelo. Esta situação reforça a discussão feita anteriormente sobre a instabilidade nas simulações de fluxos durante períodos de quadratura, devido à complexidade da influencia das componentes não-lineares da maré geradas dentro de um estuário. Algumas situações de baixas velocidades de fluxo, onde a batimetria ou a grade computacional não estiverem representando fielmente o ambiente real, podem apresentar algumas discrepâncias nos dados gerados pelo modelo.

Percebe-se, no entanto, que ao longo do tempo o modelo consegue se estabilizar, já que as instabilidades diminuem entre o momento das 03h00 (onde as correntes atingiram valores de 1,8m/s), e das 04h30, onde as velocidades de correntes atingiram máximos de 0,8m/s na margem norte, apresentando novamente uma condição de estabilidade.

Apesar das instabilidades apresentadas, é notada novamente a presença dos vórtices na margem norte durante a mudança de maré de enchente para vazante. Neste período, com velocidades de correntes bem menos intensas, não há presença da barreira hidráulica na região da enseada na frente do porto de Paranaguá e, apesar de menos intensa, há uma circulação de água nessa região para esse período.

## 8 DISCUSSÃO

A discussão dos resultados será apresentada para os tópicos mais relevantes aos objetivos deste trabalho, uma vez que durante a apresentação dos resultados, boa parte já foi discutida. A seguir, uma discussão mais detalhada dos principais resultados:

### 8.1 A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS NA RESPOSTA DO MODELO

#### 8.1.1 RESOLUÇÃO DA GRADE E BATIMETRIA

A grade utilizada neste trabalho adotou o sistema chamado *staggered grid*, que é baseado no método de diferenças finitas, e apresentou resultados satisfatórios para a resolução adotada.

A utilização do sistema *staggered grids* (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a) foi bem aceita, pois evita oscilações excessivas de elevação, o que para esta área de estudo (um estuário com pequenas profundidades, e grandes áreas intermareais) pode representar diferenças significativas nos valores de níveis e velocidade dos fluxos.

O método de diferenças finitas possibilita a implementação de uma grade ortogonal ou curvilínea, sendo a segunda adotada neste trabalho. A escolha teve como base às características morfológicas da área de estudo, devido a essa grade representar fielmente as margens da baía e os tributários, aumentando a precisão e eficiência computacional.

O refinamento da grade baseada na grade original de Herrling (2003) foi feito com o intuito de aumentar a resolução no canal de navegação e nas margens, além de preparar o domínio para a aplicação do algoritmo de *Wet and Dry*.

Esse método foi utilizado para melhor representação dos fluxos nos momentos em que os elevados níveis de água inundam as áreas de planícies

de maré; e quando a maré seca, essas áreas também secam, concentrando o fluxo apenas nos canais mais profundos. Essas planícies de maré, na área de estudo, ocupam uma parte substancial da superfície total e, para um modelo com maior resolução, a precisão dos cálculos dos termos de áreas alagadas e secas são de extrema importância na modelagem de fluxos baseadas na equação de águas rasas.

Uma justificativa prática para a aplicação deste algoritmo na área de estudo é que ele apresenta uma precisão efetiva para variações instantâneas do fluxo e grandes gradientes de nível d'água gerados pela presença de barreiras hidráulicas ou pela ocorrência de diques ou represas (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006a).

Através das análises de correntes podemos observar que em situações de velocidade de correntes elevadas, tanto de enchente quanto de vazante, o canal principal e mais profundo funciona como uma barreira hidráulica para as regiões onde há alargamento do contorno de linha de costa, principalmente na margem norte, onde o aporte de tributários não é tão intenso quanto na margem sul. Já na margem sul, onde a contribuição dos rios é maior, o fluxo consegue vencer essa barreira hidráulica, aumentando sua velocidade nas áreas de desembocaduras. Esse comportamento é evidenciado pelos mapas de vetores e intensidade de correntes da região na frente do Porto de Paranaguá.

Uma análise mais apurada dos mapas da área toda aponta para outras possíveis áreas em que o canal atua como uma barreira hidráulica, como no embaçamento mais a montante das Ilhas Gererês (Figura 4) e na região da baía de Antonina propriamente dita, na margem norte da Ponta do Félix. Este fato deve, certamente, ser de extrema importância não apenas para a hidrodinâmica, mas para a dinâmica de sedimentos, biológica e química destas áreas rasas.

Neste trabalho pode não ter sido obtido melhores resultados devido à ausência de dados batimétricos de qualidade, e com alta resolução espacial, em particular, para uma melhor representação das áreas de margens e intermareais. Essa carência de dados batimétricos ainda é o principal problema

encontrado nos trabalhos de simulações hidrodinâmicas que ocorrem no CEP, principalmente para modelos com maior resolução e que pretendem estudar os fenômenos de menor escala espacial.

As resoluções da grade numérica mostraram-se satisfatórias para as regiões do canal principal e nas margens, contudo, a diferença em magnitude e fase das correntes pode ser justificada pela menor resolução espacial da grade nas regiões dos fluxos dos rios. Este fato sugere uma correção através de um melhor ajuste nessas áreas, o que possivelmente diminuiria as velocidades das correntes por efeito de continuidade nos cálculos.

### **8.1.2 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE FUNDO (CHEZY)**

Os resultados das simulações apresentaram uma sensibilidade em relação aos parâmetros de coeficiente de rugosidade simulados com diferentes valores. Apesar do fato de que os três valores usados apresentaram resultados semelhantes em comparação aos níveis, a aplicação deste parâmetro igual a  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  foi o que teve maior representatividade no ambiente.

Diversos valores já foram testados por outros autores, Ribas (2004) verificou que, para a mesma área de estudo, valores acima de  $50 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  apresentaram instabilidade próximo das condições de contorno, fato este que foi observado neste trabalho com valores superiores a  $85 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ . O resultado aqui obtido pode ser atribuído, possivelmente, à melhor resolução da grade computacional e aos dados batimétricos inseridos no modelo que, apesar de ainda com lacunas, são mais atualizados que os usados em trabalhos anteriores.

Falkenberg (2009), simulando toda a região do CEP, adotou valores de  $90 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , considerando um valor uniforme para toda a área. Contudo, ele observou que para cada área estudada da baía, onde os tipos de sedimentos de fundo se modificavam, um valor diferente do coeficiente de atrito apresentou melhores respostas na comparação dos fluxos medidos com os simulados. O mesmo autor observou que para valores de Chezy de  $45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  para a região

da Ponta do Félix, o erro em relação aos níveis d'água foi  $0,3776 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , enquanto neste trabalho o erro encontrado foi de  $0,2732 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ . A diferença entre o resultado dos dois trabalhos pode ser atribuída à resolução da grade computacional, de forma que neste trabalho a resolução para esta área foi melhorada, representando assim melhor as variações da rugosidade do fundo. Já para simulações com valores de Chezy  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , a comparação com Falkenberg (2009) apresentou maior concordância, mesmo o autor fazendo simulações com Chezy  $60 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , os valores do erro calculado foram de  $0,2610 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , enquanto que para este trabalho o erro calculado foi de  $0,2775 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ .

Segundo Bao & Zang (2008), apesar de serem pré requisitos para uma simulação hidrodinâmica em ambientes estuarinos, ainda há muitas incertezas quanto aos cálculos dos parâmetros de rugosidade. Isso porque esses valores, que representam a resistência do fluxo quanto à perda de energia por atrito, não são fixos, e essas mudanças podem ocorrer ao longo de períodos de enchente e vazante, alterando as feições do fundo e o tipo de sedimento. O mesmo autor ainda atenta para o fato de que, com o aumento dos valores de rugosidade, o fluxo em um canal também aumenta. Essa mudança nos valores pode afetar, de fato, os picos de fluxo em um canal.

Como visto e mencionado ao longo deste trabalho, este ponto fraco da modelagem é particularmente crítico no CEP, onde as componentes de águas rasas mostram a importância de fenômenos como o atrito (e a advecção) na dinâmica local, um comportamento não-linear bem claro.

Neste sentido, também pode ser observado neste trabalho, que as simulações com valor de Chezy  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  apresentaram fluxos sensivelmente mais elevados em comparação ao obtido com valores de 30 e  $45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$ , sendo que durante o período de quadratura estes valores foram mais discrepantes, possivelmente explicados pelas complexas interações responsáveis pela geração de componentes não-lineares que ocorrem com maior intensidade neste período. As maiores velocidade de correntes apresentadas para o valor de Chezy  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  são explicadas devido ao fato de que o coeficiente de Chezy e a rugosidade serem inversamente

proporcionais, portanto pode-se perceber que quanto maior os valores do coeficiente, maior são as velocidades das correntes geradas.

Através destes resultados ficou claro que o parâmetro de rugosidade é o mais complexo parâmetro para ser estudado em uma modelagem hidrodinâmica em um estuário, sendo também de extrema importância na calibração de um modelo para que este responda com precisão às condições reais do ambiente. Segundo Chow (1959) há uma dependência do valor de Chezy com fatores como a rugosidade da superfície do leito, a vegetação ao redor, as formas de fundo, o alinhamento do canal e as variações sazonais. Com base nessas informações, podemos concluir que todos esses fatores citados são responsáveis pela resistência do fluxo na região das baías de Paranaguá e Antonina.

No entanto, assumindo um valor uniforme deste parâmetro para uma região estuarina, estamos apenas estimando uma média das condições reais e não o valor exato para cada área. Sendo assim, evidentemente, se faz necessário para uma melhor resposta quanto à discretização desse parâmetro, a utilização de um mapa de coeficiente de rugosidade para a área de estudo baseado nas feições do fundo e no tipo de sedimento.

### **8.1.3 APORTE DOS RIOS**

As simulações realizadas com e sem o aporte dos rios para o valor de coeficiente de atrito definido não apresentaram diferenças nos resultados de níveis para nenhum dos pontos de monitoramento. Isso possivelmente pode estar associado ao fato de que essa água que chega à baía através dos rios não encontra pontos de represamento que possam elevar o nível e, assim, são carregadas para fora do estuário através das correntes de vazante. Segundo Falkenberg (2009), neste ambiente o tempo de residência da água (que representa o tempo necessário para troca de água em um determinado segmento do canal) simulado para três dias durante uma maré de sizígia, apontou períodos de 5 a 20 minutos para uma célula computacional.

Analisando os mapas de vetores e comparando-se as correntes geradas nas simulações de calibração, percebe-se que no período de quadratura (Figuras 36 e 37) as velocidades de correntes de enchente foram maiores que as de vazante, o que contradiz com o padrão encontrado por Ribas (2004), através simulações hidrodinâmicas nas baías de Paranaguá e Antonina e com Camargo (1998), que encontraram valores de velocidade de vazante superiores as de enchente para períodos de marés de quarto.

A diferença entre o resultado deste trabalho e dos trabalhos citados pode estar associada à forma de utilização dos dados de vazão. Ribas (2004) realizou simulações utilizando valores de médias anuais e máximas anuais, e Camargo (1998) utilizou apenas como condições de contorno as análises das componentes de maré mais importantes que ocorrem no CEP. O mesmo autor associou os maiores valores de vazante à influência do atrito lateral e de fundo, o qual é maior em direção a cabeceira. Por fim, enquanto neste trabalho foram incluídos dados diários de vazão de todos os rios utilizados como entrada de água doce no modelo. Isso permitiria, na prática, que o modelo mostrasse este comportamento para certos períodos das simulações.

Já para o período de sizígia tanto para calibração quanto para validação, os valores de vazante foram superiores do que os de enchente, confirmando a informação dos autores citados anteriormente. Pode-se observar também que, tanto na maré enchente quanto na maré vazante, os valores de velocidade de corrente próximas à desembocadura do rio Cachoeira foram mais elevados que na região ao redor. Essa informação sugere que a circulação nestas baías é bastante influenciada pelo aporte de rios, principalmente em Antonina, onde está localizado o maior tributário da região (LANA *et al.* 2001.)

Pode-se ainda observar através dos mapas que há fluxos preferenciais de vazante nas áreas de desembocaduras dos rios Cachoeira e Nhudiaquara. Mesmo que nesta simulação não tenham sido utilizadas as vazões de todos os rios que deságuam na baía, o que é praticamente inviável pela inexistência desta informação, esses resultados provavelmente representam

significativamente bem o aporte dos rios de maior contribuição hídrica. Com isso, essas características podem corroborar as informações de que nas proximidades do Porto de Paranaguá a circulação induzida pela velocidade residual é maior do que a circulação induzida pela descarga de água doce, e que segundo Mantovanelli (1999), há uma maior influência fluvial em Antonina.

Essa circulação induzida pela velocidade residual na região da frente ao Porto de Paranaguá pode ir de encontro à informação citada por Sá (2008), onde o autor aponta altas concentrações de arsênio na margem norte, e sugere que são provenientes da cidade de Paranaguá. É provável que esse tipo de circulação seja responsável pelo transporte de uma parcela desse poluente.

#### **8.1.4 COMPONENTES NÃO-LINEARES DA MARÉ**

Dentro de um estuário as interações entre as componentes puras (astronômicas) da maré, devidas à natureza não-linear da hidrodinâmica real, modificam seu padrão de propagação e podem gerar distorções devido à troca de energia em escalas dinâmicas diferentes (MARONE, 1991).

Estes efeitos podem ser observados nos resultados, uma vez que houve distorções entre os valores de níveis, principalmente nos períodos de maré baixa. Estes fenômenos não-lineares, que até hoje não são bem compreendidos, também parecem não ser muito bem representados na modelagem.

Marone (1991) atenta que as interações não-lineares de segunda ordem ocorrem com a transferência de energia para uma terceira frequência, que não existe, necessariamente, nas componentes astronômicas de maré puras. Já quando há interação entre três frequências não-lineares, a energia passa para uma quarta frequência, sendo esta uma interação originada por fenômenos de atrito e, a primeira, pelos fenômenos advectivos.

Esse atrito pode causar efeitos de perda de energia da maré, de diferenças de amplitude e defasagem temporal nos períodos de enchente, vazante e estofo.

Mesmo não havendo ainda muitos trabalhos aonde se estudam as interações não-lineares dentro do CEP, é evidente que essas interações ocorrem, fato está evidente nas inúmeras análises harmônicas do nível do mar conduzidas no estuário (CAMARGO, 1998; CAMARGO & HARARI, 2003). Nestas, o aumento no número e na energia (associada à amplitudes) das componentes de pequeno fundo não-lineares estuário acima é um indicador indiscutível dessas interações.

Blanton *et.al* (2002) estudaram a influência das componentes M4 e M6 na componente M2 e observaram que em áreas de extensos manguezais, como é o caso da baía de Antonina, a energia da maré é consumida e, no geral, há adição de energia das componentes M4 e M6, de segunda e terceira ordens não-lineares, geradas pela interação dupla e tripla de M2 com ela própria. O “aparecimento” dessas novas componentes altera o tempo de início dos fluxos de enchente e vazante, aumentando o seu período de estofo e causando essa defasagem temporal observada nos dados e nas simulações.

Os mesmos autores ainda concluíram que o principal efeito dessas interações é aumentar a força de vazante enquanto diminui sua duração. Por outro lado, os fluxos de enchente são mais fracos e mais longos, característica observada também nas respostas das simulações deste trabalho. Estudos no CEP não mostram uma importância significativa da M6, mas mostram a importância da influência da M4 e de outras componentes de pequeno fundo (MN4 e MS4) nesta região (CAMARGO & HARARI, 2003).

Isto indicaria que, na propagação da maré no CEP, os fenômenos advectivos (segunda ordem) seriam mais relevantes que os de atrito (terceira ordem) na geração de componentes não-lineares e, conseqüentemente, na dinâmica local.

Em um dos poucos estudos sobre as componentes de maré no CEP, Camargo (1998) e Camargo & Harari (2003) estudaram doze componentes

principais, entre diurnas, semi-diurnas e componentes de pequeno fundo. Ele observou que as componentes semi diurnas são mesmo as componentes mais importantes na área de estudo, com valores de amplitude em Antonina de 0,49 m e 0,34 m para as componentes M2 e S2, respectivamente. Esses valores correspondem a uma amplificação de 50% e 40% para as componentes citadas, respectivamente. Já as velocidades de correntes dessas componentes atingiram, na região do Porto de Paranaguá valores de 0,9 m/s para M2 e 0,65 m/s para S2.

O mesmo autor observou ainda as componentes de segunda ordem ter-diurna M3 (interação entre M1 e M2) e quarto-diurna M4 (interação entre M2 e M2), e apontou a importância das mesmas, com amplificação na região de Antonina em relação a desembocadura, de 0,17 m (150% de amplificação) e 0,19 m (+ de 100% de amplificação), respectivamente.

Seguindo este mesmo raciocínio, uma análise das componentes de pequeno fundo MN4 e MS4 (interação de segunda ordem) apontou a primeira como a mais importante das componentes de pequeno fundo quarto-diurnas, com amplificação de 200% em Antonina, atingindo valores amplitudes de 0,08 m e uma defasagem de mais de uma hora, enquanto a segunda apresentou amplitude de 0,06 m e uma amplificação de 100%.

Esse comportamento não linear principalmente advectivo pode ser justificado através dos vórtices encontrados nas simulações, principalmente na região do Porto de Paranaguá.

Estes vórtices são derivados das acelerações e desacelerações localizadas, ocasionadas pela irregularidade da morfologia de fundo e dos contornos, que regem a dinâmica dos canais preferenciais de enchente ou vazante. Eles ainda podem controlar o transporte de materiais em suspensão bem como influenciar nos processos de mistura, podendo a depender do caso, favorecer ou dificultar o potencial de autodepuração das águas num determinado corpo d'água (KJERVE *et al.*, 1992). Estes efeitos são de natureza advectiva, assim como as componentes de pequeno fundo de segunda ordem que se sobressaem dentre as componentes não-lineares.

Além disso, esses movimentos oscilatórios servem de discussão para a afirmação de Blanton *et.al* (2002) citada neste item, uma vez que, neste trabalho, observou-se que as interações entre as componentes não-lineares possivelmente alteram o tempo de inversão da maré durante o período de quadratura, tornando-os mais curtos que os de sizígia. O efeito de aparecimento de um número maior de preamares e baixa-mares durante as quadraturas (*Double high water*, MARONE, 1991), faz o número de períodos de enchente e vazante aumentar dentro de um ciclo de maré, semi-diurno no caso do CEP, onde cada um tem um tempo de duração menor.

Em duas situações claras as simulações mostram discrepâncias mais significativas com os dados observados: quando a ocorrência de marés de quadratura ou nas situações de maré baixa. No primeiro caso, fenômenos advectivos não-lineares tendem a incrementar sua relevância. Já no segundo, fenômenos relacionados com os termos não-lineares de terceira ordem do atrito, aumentam sua relevância no local.

Estas informações evidenciam os resultados apresentados e discutidos neste trabalho para a importância das interações entre as componentes lineares e, principalmente, a geração das componentes não-lineares da maré, ficando evidente a necessidade de um melhor entendimento dessas interações para a compreensão dos fenômenos influenciados pela maré dentro do CEP e para sua melhor representação nos modelos numéricos.

## 9 CONCLUSÕES

As análises com o modelo Delft3D, realizadas para o período de Fevereiro de 2008 apresentaram fortes correlações entre os dados medidos e simulados. As comparações realizadas entre os parâmetros de rugosidade durante a calibração mostraram que os valores de Chezy  $65 \text{ m}^{0,5}/\text{s}^{-1}$  foram os que mais se aproximaram da situação real do ambiente. No entanto, ficou evidente, na comparação com outros trabalhos, que para uma melhor resolução deste parâmetro há necessidade de utilizar um mapa com valores de Chezy variável ao longo do domínio modelado.

Parte das discrepâncias entre os dados medidos e simulados e a qualidade da resolução do modelo apresentou dependência da batimetria, que atualmente não possui uma resolução capaz de gerar melhores resultados em modelos de maiores resoluções.

As simulações com e sem aporte dos rios foi importante para evidenciar a influência que os tributários exercem principalmente na baía de Antonina, onde a circulação induzida pela descarga de água doce é superior a circulação induzida por velocidades residuais. A simulação destes cenários evidenciou também a influência dos tributários nas regiões de desembocadura, onde os fluxos são preferencialmente de vazante.

A variabilidade das defasagens nos períodos de enchente, vazante e estofa da maré apontaram para a complexidade da interação entre as componentes não-lineares da maré dentro do ambiente estuarino, e principalmente as limitações que um modelo hidrodinâmico encontra ao resolver as equações de advecção e atrito (não-lineares) dentro do domínio modelado para alguns períodos particulares (marés de quadratura e baixamares, respectivamente).

O estudo das componentes não-lineares da maré ainda oferece mais desafios do que certezas. No entanto, ficou claro que o modelo conseguiu representar alguns dos efeitos das componentes não-lineares na dinâmica do CEP, porém, algumas interações são mais difíceis de serem modeladas,

principalmente durante eventos de maré baixa ou quadratura, onde esses efeitos são mais pronunciados, e, portanto, um melhor ajuste do modelo representaria melhor esse tipo de comportamento.

As análises dos mapas de intensidade e vetores de correntes apontaram para um efeito de barreira hidráulica nas regiões de alargamento da baía, onde as velocidades de corrente do canal principal agem como uma barreira para a renovação de água e Material Particulado em Suspensão. Este efeito pôde ser melhor observado na região em frente ao Porto de Paranaguá, onde há formações de vórtices devido as oscilações das componentes de maré que interagem entre si e com a irregularidade da morfologia do fundo.

## **9.1 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para futuros trabalhos com modelagem no CEP, seria indicada a realização de um novo levantamento batimétrico, uma vez que os dados atuais são de fontes diversas e que já estão defasadas.

Outros trabalhos podem ser feitos em cima dos que já existem:

- Um refinamento da grade computacional para as regiões de desembocadura dos rios, para uma simulação mais precisa do comportamento dos fluxos de água doce da região; Para isso, um levantamento dos dados dos tributários de menor influência poderia aumentar a qualidade das respostas quanto a este parâmetro;
- Simulações com valores de coeficiente de Chezy variável ao longo do CEP, que aumentaria a precisão dos dados, principalmente em relação as velocidade dos fluxos. Para isso é aconselhável um levantamento mais preciso dos tipos de sedimentos de fundo ao longo da região, dando um maior enfoque nas regiões a montante da baía de Antonina, onde a dinâmica de sedimentos é mais pronunciada;

- Uso de re-análise harmônica dos dados de nível do modelo para efeitos de comparação e validação mas, principalmente para identificar quais componentes não-lineares são bem representadas nas simulações e quais não, o que poderia indicar onde o modelo é robusto na representação dos fenômenos advectivos e de atrito, e onde não;
- Elaboração de um modelo 3D para a região, simulando o transporte vertical de sedimentos e proporcionando um subsídio para estudos referentes aos processos de dragagem, como dispersão da pluma durante a dragagem e após o descarte, além de possíveis áreas de descarte
- Modelagem da qualidade da água, nutrientes e compostos orgânicos a fim de observar o impacto da poluição no CEP, principalmente nos arredores de Paranaguá, Morretes e Antonina onde há fontes muitas fontes difusas de poluição.

## 10 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. C.; ROSMAN, P. C. (2001). Padrões de circulação hidrodinâmica na Lagoa da Conceição Florianópolis- SC. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS DOS PAISES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 14., Aracajú. **Anais...** Aracajú:[s.n].
- ANGULO, R. J. (1992). **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. 334 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- APPA/CEM.( 1997). **Relatório consolidado do convênio APPA/CEM**. Curitiba.
- BAO, W. ; ZHANG, Q. 2008. **Dynamic correction of Roughness in the hydrodynamic model**. Journal of Hydrodynamics. 21(2):255-263. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, China.
- BIGARELLA, J. J. *et al.* (1970). **Natureza dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina**. Rev. Instituto de Biologia e pesquisas Tecnológicas, v. 15, p.30-33.
- BIGARELLA, J. J. *et al.* (1978). **A serra do mar e a porção oriental do estado do Paraná. Um problema de segurança ambiental e nacional**. Curitiba: ADEA.
- BLANTON, J.O.; LIN, G.; ELSTON, S.A. 2002. **Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks**. Continental Shelf Research. 22, 1731-1743.
- CAMARGO, R. (1998). **Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá**. Tese (Doutorado) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CAMARGO, R.; HARARI, J. (2003). **Modeling of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil: tidal circulation and cotidal charts**. Revista Brasileira de Oceanografia, São Paulo, v. 51, n. único, p. 23-31, 2003.
- CAZATI, C. A. (2010). **Fracionamento do Fósforo em sedimentos superficiais do Complexo Estuarino de Paranaguá**. Dissertação (Mestrado) - Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná.
- CHOW, V.T. 1959. **Open Channel Hydraulics**. McGraw- Hill Book Co, New York, EUA, 680 p.

CURCIO et al. (1998). **Desmatamentos de margens de rios: a situação do rio Cachoera**. In: DE LIMA, R.E.; NEGRELHE, R.R.B. Caracterização do Nimad do Litoral paranaense. Meio ambiente e desenvolvimento no litoral do Paraná. Diagnostico. Curitiba: Ed. da UFPR, p.77-81.

DAY, J. W. *et al.* (1989). **Estuarine Ecology**. New York: John Wiley & Sons.

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

DYER, K. R., (1973). **Estuaries: A physical introduction**. New York: John Wiley & Sons.

FALCONER, R. A. (1993). An introduction to nearly horizontal flows. In: ABBOTT, M.; PRICE, W. A. **Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book**. London; [s.n], cap. 2, p. 27-36.

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

FALKENBERG, A. V. (2009). **Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do Complexo Estuarino de Paranaguá com uso da modelagem**. Pontal do Paraná. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) - Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná.

FRANCO, A. S. (1988). **TIDES. Fundamentals, Analysis and Prediction**. São Paulo Fundação Centro-Tecnológico de Hidráulica.

FRANKLIN. T. S.(2009). **A ocupação da orla da Baía da Ribeira e seus impactos sobre a hidrodinâmica local. Uma investigação através da modelagem numérica**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA.

HANSEN, D. V.; RATTRAY JUNIOR, M. (1965). Gravitational circulation in straits and estuaries. **Journal of Marine Research**, v. 23, p.104-122.

HAYATININGSIH, I. (2007). **Development of a water quality model for Paranaguá Bay**. Kiel– Alemanha, 98f. Report– Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.

HERRLING, G. (2003). **Development of a numerical model for the Paranaguá Bay in Brazil**. Kiel – Alemanha, 106f. Dissertação de Mestrado – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.

IBGE. (2008). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. [Online] Disponível: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20/08/09.

JIANG, Y.; KIRKMAN, H.; HUA, A. (2001). Megacity development: managing

impacts on marine environments. **Ocean & Coastal Management**, p.293–318.

KJERFVE, B. (1989). Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: Jr, J.D., Hall, C. (Eds. **Estuarine Ecology**. Ed. John Wiley & Sons. p.47-78.

KJERFVE, B. (1990). **Manual investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems**. UNESCO/UNDP, Columbia, 79 p.

KJERFVE, B.; SEIM, H.E.; BLURMBERG, A.F.; WRIGHT, L.D., 1992. **Modelling of the Residual Circulation in Broken Bay and the Lower Hawkesbury River, NSW**. Austrália. *J. Mar. Freshwater Res*, pp.39-57.

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

LAMOUR, M. R. (2007). **Morfodinâmica sedimentar da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR**. 161 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra- Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. C. (2004). Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – Pr. **Boletim Paranaense de Geociências**. n. 55, p. 77-82.

LANA, P. C. *et al.* (2001). The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: SELLINGER, U.; KJERVE, P. (Eds). **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**. Berlin: Springer-Verlag, p. 131-145.

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

LESSA, G. C.; ANGULO, R. J. (1995). A framework for the stratigraphy and evolution of the Paranaguá coastal plain – Paraná, Brazil. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 2., Niterói, RJ. **Anais...** Niterói, RJ: p. 92-98.

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

LEWIS, R. (1943). **Dispersion in estuaries and coastal Waters**. Brixham: John Wiley & Sons.

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

NACIONAL DE OCEANOGRAFIA, 12., Rio de Janeiro. Resumos Expandidos. p. 295-297.

MARONE, E. (1991). **Processamento e análise de dados de maré: Discurso dos métodos. Uma aplicação aos registros maregráficos e meteorológicos do litoral Sul-Leste de Buenos Aires, Argentina.** Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARONE, E.; CAMARGO, R. (1994a). Efeitos de maré meteorológica na Baía de Paranaguá, PR. **Nerítica**, v. 8, n. 1-2, p.73-85.

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

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. (1997). Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the Bay of Paranaguá. **Nerítica**, v. 11, p. 95-107.

MARONE, E. *et al.* (1997). **Caracterização física do complexo estuarino da Baía de Paranaguá.** Pontal do Sul: UFPR. v. 2. Relatório consolidado do convênio APPA/CEM.

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

MEUNIER, P. *et al.* (2006). Flow pattern and sediment transport in a braided river: The “torrent de St. Pierre” (French Alps). **Journal of Hydrology**. v.330. p. 496-505.

MIRANDA, L. B.(1990). 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.

MIRANDA, L. B. (1996). **Cinemática e dinâmica de estuários.** São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOF827), v. 1.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. (2002). **Princípio de oceanografia física de estuários.** São Paulo: Edusp.

MMA/PNMA. (1998). **Caracterização dos ativos ambientais em áreas selecionadas da zona costeira brasileira.** Brasília.

NIMAD. (1994). **Interações entre os processos produtivos, meio ambiente e qualidade de vida na região da baía de Paranaguá e região**

**metropolitana de Curitiba:** geração de propostas de desenvolvimento. Curitiba.

NOERNBERG, M. A. (2001). **Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados *in situ* e Landsat-TM.** 127 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade federal do Paraná, Curitiba.

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

ODRESKI, L. L. R. *et al.* (2001). Mudanças na distribuição dos sedimentos da superfície do fundo da baía de Antonina, Estado do Paraná, entre 1966 e 1995. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUARTENÁRIO, Mariluz. **Anais...** Mariluz.

ODRESKI, L. L. R. O. (2002). **Evolução sedimentar e batimétrica da baía de Antonina- PR.** Curitiba. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PETROBRAS. (1997). **Estudos Ambientais em Áreas Oceânicas e Costeiras no Sul do Brasil.** Relatório Final. 1 CD-ROM.

PUGH, D. T. (1987). **Tides, surges and mean sea level.** Great Britain : British Library Cataloguing.

PRITCHARD, D. W. (1955). **Estuarine circulation patterns.** [S.l.]: Proc. Am. Soc. Civil Engineering, 81, p. 717:1-11.

RIBAS, T. M. (2004). **Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das baías de Antonina e Paranaguá- PR.** 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SÁ, F. (2008). **Geoquímica do arsênio no Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá.** 114 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro.

SOARES, C. R. S. *et al.* (1996). Caracterização da distribuição dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina, estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., Salvador. **Anais...** Salvador: SBG, v. 3, p. 390-393.

SOTO, Y. J. M. (2004). **A Modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do Complexo Estuarino de Antonina - Paranaguá- PR.** 187 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

STOWA/RIZA, (1999). **Good Modelling practice handbook**. STOWA report 99-05, Dutch dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment report 99.036.

TOBÓN, C. A. P. (2002). **Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la Bahía Meldrof em La Costa Del Mar Del Norte Alemán**. Trabajo (Posgrado em Reaprovechamento de Recursos Hidráulicos) - Faculdade Nacional de Mina, Universidad Nacional de Colômbia.

WL | Delft Hydraulics, (2006a). **Delft3D – FLOW User Manual**. Holanda Delft.

WRIGHT, A.; NORTON, P. (2000). Inter-comparison between one, two and three dimensional numerical models. In: **Modelling estuary morphology and processes – final report**. Estuaries Research Programme, phase 1. Research by Enphasys Consortium for MAFF Project FD1401.