

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental

Jessyca Petry Dalazen

**MODELAGEM NUMÉRICA DA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO
COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

Curitiba

2017

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental

Jessyca Petry Dalazen

**MODELAGEM NUMÉRICA DA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO
COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr. Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida

Curitiba

2017

D136m

Dalazen, Jessyca Petry

Modelagem numérica da renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá / Jessyca Petry
Dalazen. – Curitiba, 2017.

91 f. : il. color. ; 30 cm.

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

Orientadora: Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha.

Coorientador: Ricardo Carvalho de Almeida.

1. Renovação das águas. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. Estuário. 4. SisBaHiA. I. Universidade Federal do Paraná. II. Cunha, Cynara de Lourdes da Nobrega. III. Almeida, Ricardo Carvalho de. IV. Título.

CDD: 628



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016075P3

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JESSYCA PETRY DALAZEN**, intitulada: "**MODELAGEM NUMÉRICA DA RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

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

Curitiba, 21 de Novembro de 2017.

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

MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG
Avaliador Externo (UFPR)

MAURÍCIO FELGA GOBBI
Avaliador Interno (UFPR)

Agradecimentos

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional durante toda a minha formação.

À minha orientadora, Professora Cynara L. N. Cunha, pela partilha de conhecimentos, dedicação, paciência e, em especial, pelas inúmeras caronas durante todo o processo.

Ao meu coorientador, Professor Ricardo C. Almeida, pela ajuda essencial na elaboração deste trabalho e pelos momentos de “queijos e cocas” compartilhados no LEMMA.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudos concedida.

E aos meus amigos, que trouxeram leveza durante essa árdua caminhada.

Resumo

O estudo da circulação hidrodinâmica e de parâmetros que ajudem a entender a renovação das águas em estuários, tais como a taxa de renovação, a idade da água, entre outros, pode ser considerado um importante instrumento na gestão ambiental dos estuários, pois possibilita um melhor conhecimento sobre os processos dispersivos que nele ocorrem e sobre o tempo que poluentes ficam retidos no seu interior, facilitando a identificação de possíveis áreas de estagnação. Através do sistema de modelagem computacional SisBaHiA[®], neste trabalho foram calculadas as taxas de renovação, a idade da água e o escoamento residual, para diferentes cenários hidrodinâmicos, das águas do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizado no estado do Paraná, Brasil. Foram implementados um modelo hidrodinâmico e um modelo de transporte euleriano para a representação dos padrões de circulação hidrodinâmica e de transporte da região, que foram calibrados com dados medidos de elevação e temperatura d'água. Ambos os modelos apresentaram bom desempenho, produzindo erros relativos médios menores do que 5%. Após a calibração, foram criados cenários hidrodinâmicos distintos, para um período representativo de verão e um de inverno, com o intuito de analisar qual forçante (maré, vazão ou vento) influencia mais na renovação das águas do CEP e de identificar as possíveis áreas de estagnação. Os cenários mostraram-se eficazes para apontar a maré as vazões fluviais como as forçantes de maior importância na renovação das águas do CEP. Em todos os cenários foram identificadas duas possíveis áreas de estagnação — a região da baía dos Pinheiros e a região da baía de Paranaguá — dado que apresentaram menores taxas de renovação e maior idade da água quando comparadas com as outras regiões.

Palavras Chave: renovação das águas, modelagem hidrodinâmica, SisBaHiA[®].

Abstract

Studying hydrodynamic circulation and parameters that help to understand the water renewal of estuaries, such as water renewal rate and water age, can be considered an important instrument in the environmental management of estuaries, as it allows a better understanding of dispersive processes that occur in these regions and the time that pollutants would be trapped inside of these water bodies, which would facilitate the identification of possible stagnation areas. This work calculated water renewal rates, water age and residual circulation for different hydrodynamic scenarios in the Paranaguá Estuarine Complex (Paraná, Brazil) using the SisBaHiA[®] system. A hydrodynamic model and an Eulerian transport model were implemented to represent the hydrodynamic circulation and the transport patterns of the region, which were calibrated with free surface position and water temperature data, respectively. Both models presented good performance, producing average relative errors lower than 5%. Different hydrodynamic scenarios were created to represent the summer and winter seasons, in order to analyze which hydrodynamic force (tide, river flow or wind) would have more influence on the water renewal in the CEP and to identify possible stagnation areas. The scenarios proved to be effective to point out the tide and the river flows as the most important hydrodynamic force in the renewal of the CEP waters. Two possible stagnation areas were identified in all scenarios — the regions of Pinheiros bay and of Paranaguá bay — as they presented lower renewal rates and higher water ages when compared to the other regions.

Keys: water renewal, hydrodynamic modeling, SisBaHiA[®].

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Mapa de localização do CEP. | 17 |
| 2.2 | Zonas de um sistema estuarino. Fonte: Miranda et al. (2002). | 18 |
| 3.1 | Discretização do domínio de modelagem do CEP com a localização das estações e dos principais rios afluentes. | 33 |
| 3.2 | Batimetria (m) utilizada neste trabalho no domínio de modelagem do CEP. . . . | 34 |
| 3.3 | Valores da amplitude da rugosidade de fundo (m) utilizados neste trabalho no domínio de modelagem do CEP. | 35 |
| 3.4 | Curva de maré prevista para janeiro, fevereiro e março de 2001, obtida a partir das constantes harmônicas mostradas na Tabela 3.2. | 37 |
| 3.5 | Rosa de distribuição dos ventos na estação de Antonina para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: SIMEPAR. | 38 |
| 3.6 | Vazão dos principais afluentes do CEP para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: HidroWeb e Mantovanelli (1999). | 39 |
| 3.7 | Variação temporal da radiação solar, temperatura e umidade na estação de Antonina para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: SIMEPAR. | 40 |
| 3.8 | Vazão média dos principais afluentes do CEP para os meses de janeiro, fevereiro e março (verão) e para os meses de junho, julho e agosto (inverno). Fonte: HidroWeb e Mantovanelli (1999). | 42 |
| 3.9 | Representação dos domínios do WRF utilizados na regionalização dinâmica. . . . | 44 |
| 3.10 | Localização das 150 estações obtidas com a grade mais interna do WRF. | 44 |
| 3.11 | Rosa da distribuição dos ventos gerados com o WRF para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2009 nas Estações 1, 2, 3 e 4. | 45 |
| 3.12 | Rosa da distribuição dos ventos gerados com o WRF para os meses de junho, julho e agosto de 2009 nas Estações 1, 2, 3 e 4. | 46 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.13 | Condição inicial utilizada para as simulações, no Cenário 2-V, da taxa de renovação das águas no CEP. | 47 |
| 3.14 | Condição inicial utilizada para as simulações, no Cenário 2-V, da idade das águas do CEP. | 49 |
| 4.1 | Comparação entre os valores da elevação simulados pelo SisBaHiA [®] e medidos na estação F. | 51 |
| 4.2 | Campo de velocidades em um instante de maré de sizígia ($t = 3214800 s$). | 52 |
| 4.3 | Comparação entre as amplitudes e as fases das principais componentes harmônicas, obtidas a partir dos dados de elevação medidos e simulados pelo SisBaHiA [®] na estação F. | 53 |
| 4.4 | Comparação entre os valores de temperatura da água simulados pelo SisBaHiA [®] e medidos na estação F. | 54 |
| 4.5 | Valores de elevação obtidos com o SisBaHiA [®] nas estações E e F para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V). | 56 |
| 4.6 | Valores da componente E-W da velocidade obtidos com o SisBaHiA [®] para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V). | 57 |
| 4.7 | Valores da componente N-S da velocidade obtidos com o SisBaHiA [®] para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V). | 57 |
| 4.8 | Evolução temporal das taxas de renovação para os cenários 1-V (maré), 2-V (maré e vazão) e 3-V (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1). | 59 |
| 4.9 | Taxas de renovação para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-V (imagem em cima, à esquerda), 2-V (imagem em cima, à direita) e 3-V (imagem embaixo). | 60 |
| 4.10 | Evolução temporal da idade da água para os cenários 1-V (maré), 2-V (maré e vazão) e 3-V (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1). | 62 |
| 4.11 | Idade da água para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-V (imagem em cima, à esquerda), 2-V (imagem em cima, à direita) e 3-V (imagem embaixo). | 63 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.12 | Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h para o Cenário 2-V (maré e vazão). | 65 |
| 4.13 | Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de uma semana para o Cenário 2-V (maré e vazão). | 66 |
| 4.14 | Vórtices formados pelo campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h (imagem à esquerda) e ao longo de uma semana (imagem à direita) para o Cenário 2-V (maré e vazão). | 67 |
| 4.15 | Valores de elevação obtidos com o SisBaHiA [®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I). | 69 |
| 4.16 | Valores da componente E-W da velocidade obtidos com o SisBaHiA [®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I). | 70 |
| 4.17 | Valores da componente N-S da velocidade obtidos com o SisBaHiA [®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I). | 71 |
| 4.18 | Evolução temporal das taxas de renovação para os cenários 1-I (maré), 2-I (maré e vazão) e 3-I (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1). | 72 |
| 4.19 | Taxas de renovação para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-I (imagem em cima, à esquerda), 2-I (imagem em cima, à direita) e 3-I (imagem embaixo). | 73 |
| 4.20 | Evolução temporal da idade da água para os cenários 1-I (maré), 2-I (maré e vazão) e 3-I (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1) | 75 |
| 4.21 | Idade da água para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-I (imagem em cima, à esquerda), 2-I (imagem em cima, à direita) e 3-I (imagem embaixo). | 76 |
| 4.22 | Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h para o Cenário 2-I (maré e vazão). | 78 |
| 4.23 | Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de uma semana para o Cenário 2-I (maré e vazão). | 79 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.24 | Vórtices formados pelo campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h (imagem à esquerda) e ao longo de uma semana (imagem à direita) para o Cenário 2-I (maré e vazão). | 80 |
| 4.25 | Comparação da evolução temporal das taxas de renovação, para o Cenários 3 (maré, vazão e vento), entre os períodos representativos de verão (3-V) e inverno (3-I). | 83 |
| 4.26 | Comparação da evolução temporal da idade da água, para o Cenários 3 (maré, vazão e vento), entre os períodos representativos de verão (3-V) e inverno (3-I). | 84 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo (ε) para leito de sedimentos com rugas e similares. Adaptado de Abbott e Basco (1989). Fonte: Rosman (2017). | 35 |
| 3.2 | Amplitude e fase das constantes harmônicas usadas no modelo. | 37 |
| 4.1 | Valores de taxa de renovação (%) para todos os cenários nas estações A, B, C, D, E e F, após 90 dias de simulação. | 81 |
| 4.2 | Valores da idade da água (dias) para todos os cenários nas estações A, B, C, D, E e F, após 90 dias de simulação. | 82 |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução e objetivos | 14 |
| 1.1 | Objetivos específicos | 15 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 16 |
| 2.1 | Sistemas estuarinos: o CEP | 16 |
| 2.2 | Renovação das águas em sistemas estuarinos | 21 |
| 2.3 | Escoamento residual | 25 |
| 2.4 | Modelagem computacional: SisBaHiA [®] | 26 |
| 2.4.1 | Modelo hidrodinâmico | 28 |
| 2.4.2 | Modelo de Transporte Euleriano | 30 |
| 3 | Metodologia | 32 |
| 3.1 | Domínio de modelagem | 32 |
| 3.2 | Forçantes hidrodinâmicas do modelo | 36 |
| 3.2.1 | Calibração dos modelos | 36 |
| 3.2.2 | Cenários hidrodinâmicos | 40 |
| 3.3 | Cálculo das taxas de renovação, idade da água e escoamento residual | 46 |
| 4 | Resultados e discussões | 50 |
| 4.1 | Calibração e ajuste dos modelos | 50 |
| 4.2 | Cenários hidrodinâmicos: período representativo de verão (1-V, 2-V e 3-V) | 55 |
| 4.2.1 | Taxas de renovação | 58 |
| 4.2.2 | Idade da água | 61 |
| 4.2.3 | Escoamento residual: Cenário 2-V | 64 |
| 4.3 | Cenários hidrodinâmicos: período representativo de inverno (1-I, 2-I e 3-I) | 68 |
| 4.3.1 | Taxas de renovação | 71 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2 | Idade da água | 74 |
| 4.3.3 | Escoamento residual: Cenário 2-I | 77 |
| 4.4 | Resumo quantitativo: taxa de renovação e idade da água | 81 |
| 4.5 | Cenário 3: comparação verão x inverno | 82 |
| 5 | Conclusões e recomendações | 85 |
| | Referências Bibliográficas | 87 |

1 Introdução e objetivos

Os estuários são ecossistemas de transição entre o oceano e o continente, possuindo maior complexidade e vulnerabilidade às atividades antrópicas. O papel de filtragem dos estuários faz com que as suas águas apresentem altas concentrações de nutrientes, estimulando a produção primária e as tornando biologicamente mais produtivas (Miranda et al., 2002). Esses ecossistemas possuem uma importância histórica, visto que a maior parte das grandes cidades está localizada próxima a lagos e estuários (Souza e Kjerve, 1997). Nesse contexto, regiões estuarinas acompanhadas com altos graus de urbanização vêm sendo alvo de grande preocupação ambiental devido às agressões antrópicas que vêm sofrendo, como despejo de efluentes, atividades de pesca e navegação, entre outras, que podem causar efeitos nocivos à flora e fauna aquática e à saúde humana.

Fatores como a geometria dos estuários, as marés e os efeitos causados pela entrada de vazões fluviais definem o escoamento das águas e o transporte de poluentes nesses ambientes (Roversi et al., 2016). A qualidade da água dos estuários pode ser determinada por variáveis de estado, como a temperatura, poluentes, entre outras, e está fortemente ligada a sua capacidade de renovação, que pode ser estimada através do cálculo de taxas de renovação.

Assim, o estudo da circulação hidrodinâmica e de parâmetros que ajudem a entender a renovação das águas em estuários, tais como a taxa de renovação, a idade da água, entre outros, é um importante instrumento na gestão ambiental dessas regiões, pois possibilita um melhor conhecimento sobre os processos de mistura que nela ocorrem e sobre o tempo que ficam retidas no seu interior, bem como quais os forçantes mais importantes nesses processos (maré, vento, vazão, etc.), facilitando a identificação de possíveis áreas de estagnação.

Grande parte dos trabalhos que estudam os processos de renovação das águas baseia-se na modelagem numérica (Grifoll et al., 2014). A técnica de modelagem computacional constitui uma metodologia de alto potencial para representar os padrões de circulação e de transporte de poluentes em corpos hídricos, uma vez que os modelos numéricos são ferramentas integradoras, que possibilitam uma visão dinâmica do que ocorre nesses sistemas, consideradas fundamentais na realização de estudos e no auxílio à tomada de decisões estratégicas no que se refere à gestão de recursos hídricos.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo geral analisar a renovação das águas do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), através do uso do sistema computacional SisBaHiA[®]. O CEP está localizado na região Sul do Brasil, na planície costeira do Paraná, no interior da Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaraqueçaba, e recebe grande parte da drenagem da bacia hidrográfica litorânea paranaense. Além disso, possui uma grande importância econômica no setor pesqueiro, industrial e turístico, associada às intensas atividades dos dois portos que estão localizados no complexo (Porto de Paranaguá e Porto de Antonina).

1.1 Objetivos específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- Aplicar e calibrar, com dados medidos de elevação, o modelo de circulação hidrodinâmica do SisBaHiA[®], para estudar os padrões de circulação das águas do CEP.
- Aplicar e ajustar, com os dados medidos de temperatura da água, os parâmetros difusivos do modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®], para que seja possível utilizá-lo no cálculo da taxa de renovação e da idade da água.
- Testar cenários distintos para avaliar a influência das forçantes (maré, vento e aporte fluvial) na renovação das águas da área de estudo.
- Estimar, através de alguns indicadores, a renovação das águas do CEP — taxa de renovação, idade da água e escoamento residual — para os diferentes cenários.
- Definir possíveis regiões de estagnação na área de estudo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas estuarinos: o CEP

De acordo com uma das definições mais comumente adotadas, proposta Cameron e Pritchard (1963):

“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) está localizado na região Sul do Brasil (Figura 2.1), na porção centro-norte do litoral do Paraná, com uma área superficial de 612 km^2 , possuindo três conexões com o oceano Atlântico: o canal Norte, localizado entre a Ilha do Superagui e a Ilha das Peças; o canal Sueste, localizado entre a Ilha das Peças e a Ilha do Mel; e o canal da Galheta, localizado abaixo da Ilha do Mel. Engloba cinco municípios (Antonina, Guaraqueçaba, Morretes, Paranaguá e Pontal do Paraná) que, de acordo com o censo do IBGE de 2010, somam juntos uma população de aproximadamente 200 mil habitantes.

O CEP é composto por dois eixos principais, o eixo na direção Norte-Sul (N-S), que é ocupado pelas baías das Laranjeiras, dos Pinheiros e de Guaraqueçaba, e o eixo na direção Leste-Oeste (E-W), ocupado pelas baías de Paranaguá e de Antonina (Marone e Noernberg, 2003). O eixo E-W recebe o aporte direto dos principais rios, estando assim, sob maior influência da bacia de drenagem e, conseqüentemente, recebe uma maior entrada de sedimentos fluviais (Noernberg et al., 2006).

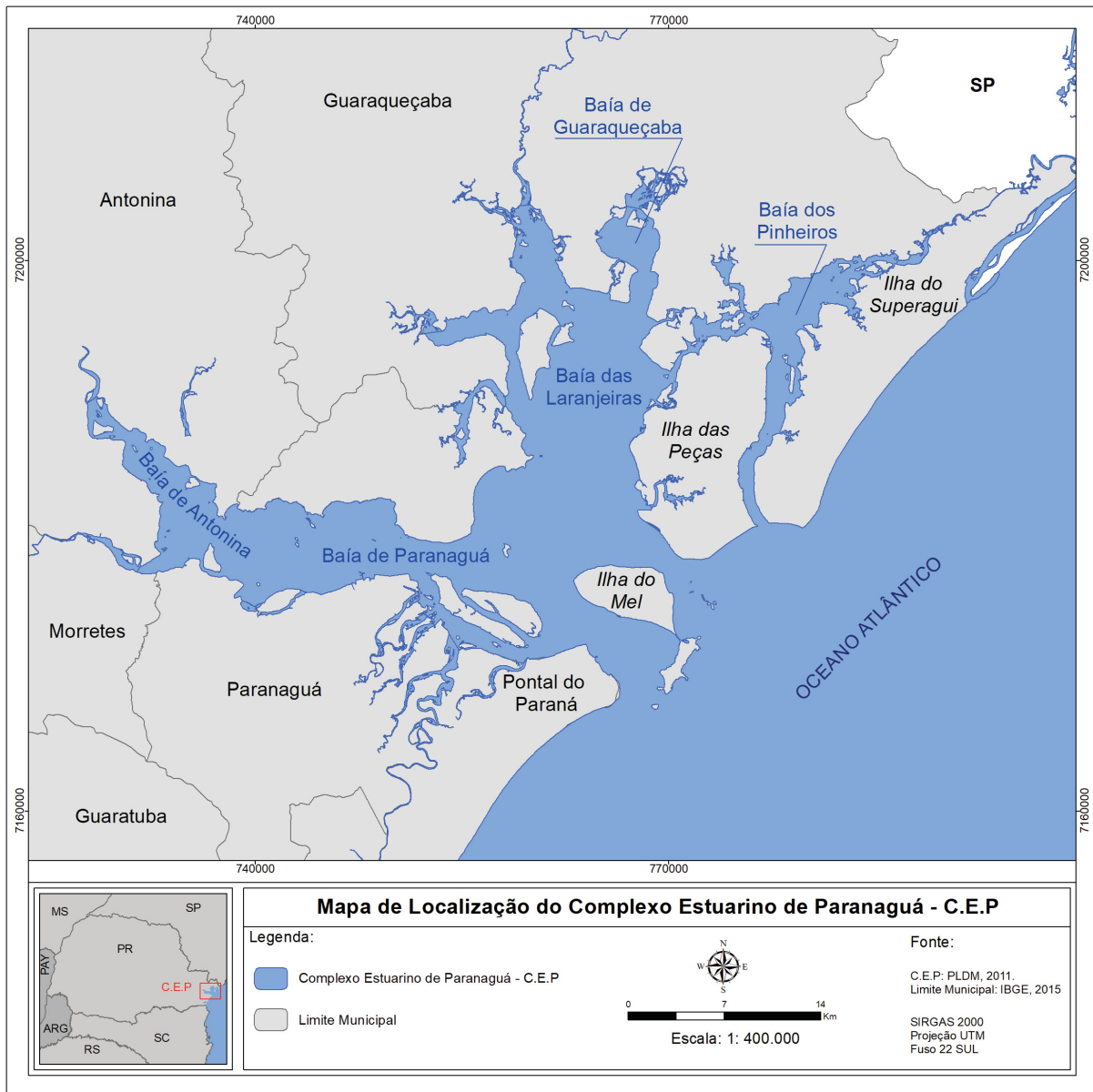


Figura 2.1: Mapa de localização do CEP.

Outra definição de estuário foi proposta por Kjerfve et al. (1987):

“Estuário é um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente. Esse ambiente pode ser subdividido em três zonas distintas:

- Zona de Maré do Rio (ZR): regiões próximas aos rios que sofrem pouca influência das marés e possuem salinidade próxima a zero.
- Zona de Mistura (ZM): regiões onde ocorre a mistura de água doce da drenagem

continental com a água oceânica.

- Zona Costeira (ZC): regiões adjacentes à fronteira de mar aberto onde a salinidade é próxima à salinidade oceânica”.

A Figura 2.2 apresenta a divisão do estuário em zonas de acordo com a definição de Kjerfve et al. (1987). Através dela é possível perceber que, na transição entre a ZR e a ZM, existe uma região chamada de Zona de Máxima Turbidez (ZMT), caracterizada pela alta concentração de material particulado em suspensão (MPS). Na ZMT ocorre um aprisionamento dos sedimentos, impedindo ou retardando a sua saída para a ZC. O conhecimento dos processos que ocorrem nessa região contribui para um melhor gerenciamento das águas estuarianas, pois é nela que pode ocorrer a associação entre poluentes e sedimentos, que acumulam no fundo do estuário ou podem ser levados para o oceano (Zem et al., 2007).

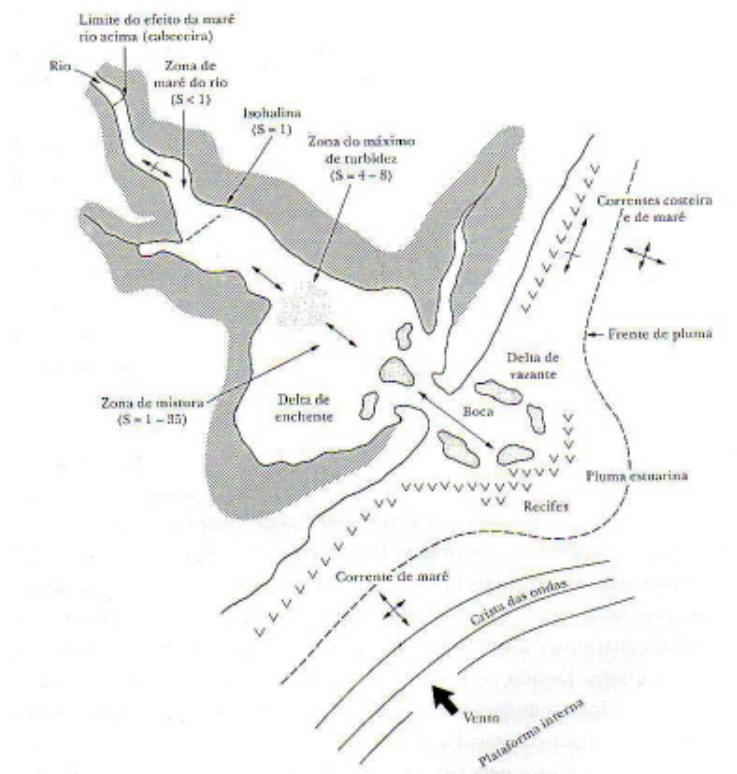


Figura 2.2: Zonas de um sistema estuarino. Fonte: Miranda et al. (2002).

Os estuários também podem ser classificados de acordo com as suas características geomorfológicas, ou seja, quando são considerados os processos geológicos e geomorfológicos que ocorreram durante sua formação. O CEP foi desenvolvido a partir do afogamento de vales de rios

durante a elevação do nível do mar no Holoceno e, portanto, caracteriza-se geomorfologicamente como um estuário de planície costeira com profundidade rasa (Mantovanelli, 1999).

A planície costeira paranaense possui clima tipo subtropical úmido mesotérmico com verão quente (Cfa), segundo Koeppen, possuindo temperatura média anual em torno de 20°C, com chuvas em todos meses, não apresentando estação seca definida (Bigarella et al., 1978). Segundo Mantovanelli et al. (2004), 40% do total anual da precipitação pluviométrica ocorrem nos meses mais chuvosos, que são entre janeiro e março, e 15% nos meses mais secos, que são entre junho e agosto. O CEP recebe a drenagem de cerca de 70% da área da bacia hídrica do litoral paranaense, sendo que as bacias de Antonina e Paranaguá correspondem a 54% da drenagem do CEP. Mantovanelli (1999) realizou estudos na região nos anos de 1997 e 1998 e determinou que os rios Cachoeira e Nhundiaquara somam 82% do total de aporte de água doce nesse sistema. Já a dinâmica dos ventos no litoral paranaense é definida, basicamente, pelo Anticiclone do Atlântico Sul e pelo Anticiclone Migratório Polar (Neto et al., 2010).

A região do CEP está enquadrada nos domínios fitogeográficos da Floresta Ombrófila Densa e ecossistemas associados, caracterizando-se pela formação de uma vegetação de grande complexidade, estratificada, de maior altura e com alta diversidade de espécies (Silveira et al., 2012). Aproximadamente 70% do litoral paranaense situa-se no interior de áreas de preservação, existindo em seu território dezoito Unidades de Conservação (UC's). Dentre as dezoito UC's, treze são Unidades de Proteção Integral e cinco são Unidades de Uso Sustentável, sendo uma a Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaraqueçaba, que engloba quase toda a região do CEP (Noernberg et al., 2008). Esse complexo estuarino também é caracterizado por possuir diversos habitats naturais, como dunas, manguezais, pântanos de água salgada, extensos planos de maré, entre outros, que abrigam diversas espécies de peixes, pássaros, mamíferos, entre outros (Lana et al., 2001).

Ademais, sistemas estuarinos também podem ser categorizados de acordo com os padrões de estratificação vertical de salinidade que apresentam. Esses padrões são diretamente influenciados pela geometria dos estuários, pela descarga de água doce, pela maré, pelo vento e pela circulação da região oceânica próxima (Cameron e Pritchard (1963) *apud* Miranda et al. (2002)). O CEP é classificado como parcialmente misturado do tipo B (Marone et al., 2007). Por possuir padrões de estratificação fracos, é possível estudar as concentrações de alguns

constituintes no CEP com variáveis médias na vertical, ou seja, as equações governantes de conservação de quantidade de movimento e de massa podem ser promediadas na vertical, reduzindo a dimensão do problema e possibilitando a utilização de modelos bidimensionais (Cunha et al., 2015).

Os padrões de circulação e o transporte de poluentes em estuários são complexos e sujeitos a grandes variações espaciais e temporais, resultantes da interação de três principais forças motrizes: a entrada de água doce vinda dos rios, as marés e o vento (Mantovanelli et al., 2004). Segundo Knoppers et al. (1987), a circulação hidrodinâmica no CEP é regida principalmente pelo aporte fluvial e pela maré. A propagação da onda de maré está associada a um intenso processo advectivo em uma região cujas características de topografia são importantes, visto que essa onda, ao adentrar o estuário, sofre distorções devido à diminuição de profundidade e ao estreitamento dos canais, o que tende a aumentar sua amplitude (Lopes, 2010).

É possível prever o movimento periódico das marés astronômicas para qualquer lugar através da análise dos constituintes harmônicos (Truccolo, 1998), que são ondas sinusoidais com frequência determinada pelo efeito das forças de atração gravitacional que a Lua e o Sol exercem continuamente sobre a Terra. A diferença entre a maré prevista e a observada é chamada de maré meteorológica, causada pelos efeitos meteorológicos, como as variações da pressão atmosférica e a troca de quantidade de movimento entre o campo de velocidades do vento e a superfície do mar (Marone e Camargo, 1994).

O CEP possui um regime de marés semi-diurno (ocorrem dois ciclos de maré durante um dia lunar) com amplitude média igual a $2,2\text{ m}$ em períodos de sizígia e um prisma de maré de $1,34\text{ km}^2$ (Lana et al., 2001). As correntes de maré no local atingem velocidades máximas de enchente e vazante superiores a 80 cm/s^{-1} e 110 cm/s^{-1} , respectivamente (Marone et al., 1995). As componentes mais importantes da maré astronômica são as semidiurnas M_2 (principal componente lunar) e S_2 (principal componente solar), representando cerca de 50% da altura da maré (Noernberg et al., 2008). A amplitude da componente M_2 amplifica cerca de 50% desde a desembocadura até Antonina, chegando a atingir $0,49\text{ m}$, e sua defasagem temporal nas preamares e baixa-mares das áreas internas em relação a região costeira chega a $0,85\text{ h}$ (Lopes, 2010).

O conhecimento sobre a circulação hidrodinâmica de corpos hídricos serve como base para que

vários outros estudos nesses ambientes possam ser realizados. Neste contexto, alguns trabalhos que estudaram a circulação hidrodinâmica do CEP podem ser destacados: Mantovanelli (1999) caracterizou o transporte de MPS e suas principais forças motrizes (maré e aporte de água doce) nas estações seca e chuvosa, quantificando o aporte de água doce e MPS através de medições realizadas em diferentes estágios do ciclo de maré; Cunha et al. (2015) estudaram de forma qualitativa o transporte de sedimentos e as suas implicações na dinâmica do CEP, identificando potenciais áreas de deposição e erosão destes sedimentos (ZMT); Lamour (2007) estudou o transporte de sedimentos na área de desembocadura do CEP, caracterizando os sedimentos e as feições de fundo nesta região e a evolução do relevo de fundo das áreas rasas nos últimos 160 anos.

2.2 Renovação das águas em sistemas estuarinos

O estudo sobre a taxa em que constituintes, como poluentes e sedimentos, são expelidos da região interna dos estuários para a região costeira adjacente é uma importante ferramenta para entender a circulação hidrodinâmica dessas regiões e para a gestão da qualidade de suas águas, principalmente quando esses ambientes estão sujeitos às poluições de origem antrópica. Existem vários parâmetros que são utilizados para descrever esses processos de renovação, como por exemplo, o tempo de residência, o tempo de descarga hidráulica, a taxa de renovação e a idade da água (Monsen et al., 2002). De modo geral, estuários com menores taxas de renovação e tempos de residência, ou com águas mais “novas” (idade da água menor), teriam menos problemas de qualidade de água, visto que os poluentes ficariam menos tempo dentro do estuário e teriam menor probabilidade de se agregar aos sedimentos, de se depositar no fundo e de contribuir para a eutrofização (Kenov et al., 2012).

No conceito tradicional, o tempo de residência para um corpo hídrico é considerado igual a razão entre o volume desse corpo hídrico e a vazão que passa pelo mesmo, indicando indiretamente o tempo requerido para a renovação desse volume de água. De forma análoga, o tempo de descarga hidráulica é utilizado para sistemas estuarinos, posto que este parâmetro é definido como a razão entre o volume de água doce e a vazão de água doce afluyente (Rosman, 2017). Assim, aplicando esse conceito para estuários, esse parâmetro mede o tempo que leva

para uma parcela de água deixar esse sistema e ir para a região costeira adjacente ((Dronkers e Zimmerman, 1982) *apud* Monsen et al. (2002)).

Kenov et al. (2012) estudaram o tempo de descarga hidráulica no estuário de Mondego, em Portugal, utilizando um modelo de fração de água doce, proposto por Dyer em 1973. Esse modelo calcula o tempo de descarga hidráulica, ou o tempo de residência, através de um método simples que utiliza dados de salinidade para estimar o volume de água doce do estuário (V_d) e o divide pela vazão média de água doce (Q) que entra no mesmo em um certo período de tempo (Equação 2.2). V_d é calculado multiplicando-se o volume total do estuário (V_t) pela fração de água doce (F_f), que por sua vez é calculada através da comparação entre a salinidade média do estuário (S_{med}) e a salinidade da água costeira (S_0) (Equação 2.1).

$$F_f = \frac{S_0 - S_{med}}{S_0} \quad (2.1)$$

$$TR = \frac{F_f \times V_t}{Q} = \frac{V_d}{Q} \quad (2.2)$$

O tempo de residência ou o tempo de descarga hidráulica possuem aplicabilidade prática em corpos de água bem misturados, sendo impróprio utilizá-los para calcular a renovação das águas de corpos mais heterogêneos, como sistemas estuarinos com geometrias mais complexas por exemplo, pois seriam indicativos muito grosseiros das efetivas taxas de renovação nas diferentes áreas desses sistemas. Através do uso de traçadores, é possível calcular tempos de residência para diferentes condições hidrodinâmicas, aumentando assim a aplicabilidade desse termo (Rosman, 2017).

Um estudo que utiliza essa metodologia foi realizado por Cucco e Umgiesser (2005) para investigar a capacidade de renovação da Lagoa de Venezia, localizada no nordeste do Mar Adriático. Para isso, utilizaram um modelo hidrodinâmico bidimensional para resolver os padrões de circulação da lagoa e do Mar Adriático com forçantes de vento e maré em três cenários distintos: o primeiro cenário só considera valores de maré e os outros dois consideram os valores de maré e dois regimes típicos de vento na região. Nos três cenários, um traçador passivo S sujeito aos processos de advecção e difusão é lançado na lagoa com uma concentração inicial que corresponde a 100%. Esse traçador, submetido à ação das forças de maré e do vento, é

carregado para “fora’ e, frequentemente, de volta para dentro da lagoa através das três conexões que a mesma possui com o Mar Adriático. Isso leva a um decaimento da concentração de S na lagoa e sua concentração remanescente ($r(x, y, t)$) é representada por (Cucco e Umgiesser, 2005):

$$r(x, y, t) = \frac{C(x, y, t)}{C_0(x, y)} \quad (2.3)$$

onde $C(x, y, t)$ é a concentração de S na posição x, y e no tempo t ; $C_0(x, y)$ é a concentração inicial ($t = 0$ s) de S na posição x, y .

Assim, o tempo de residência (τ) nesse estudo é considerado como o tempo necessário para cada elemento do domínio estudado substituir a massa desse traçador S com água limpa, sendo definido por (Takeoka (1984) *apud* Cucco e Umgiesser (2005)):

$$\tau(x, y) = \int_0^{\infty} r(x, y, t) dt \quad (2.4)$$

Assumindo que a concentração de S decai de forma exponencial

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha t} \quad (2.5)$$

onde α é a constante de decaimento de S , a solução da Equação 2.4 se resume a:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad (2.6)$$

A taxa de renovação pode ser considerada como as taxas de troca de água dentro de um determinado volume de controle, informando quanto (%) desse volume de água foi renovado. Utilizando essa definição, que é a mesma adotada pelo SisBaHiA[®] e pelo presente trabalho, Roversi et al. (2016) analisaram as taxas de renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos, localizado no litoral do Estado de São Paulo. Para isso, foram reproduzidos cenários hidrodinâmicos, por meio do SisBaHiA[®], considerando os efeitos de maré astronômica, das vazões fluviais afluentes de verão e inverno e do gradiente horizontal de salinidade. Foram feitas simulações, durante um período de 90 dias, do transporte euleriano de um constituinte

conservativo para os cenários de verão e inverno. No instante inicial, foi suposto que a água que estava dentro da região de interesse possuía um valor de referência igual a zero, já a água que estava fora, as vazões fluviais afluentes e o afluxo através da fronteira aberta na região costeira possuíam valor igual a 100. Deste modo, os valores de concentração podiam ser interpretados como valores de referência de porcentagem de “água nova”, o que possibilitou quantificar, em diferentes posições e intervalos de tempo, a taxa de renovação das águas no Sistema Estuarino de Santos.

Já a idade de uma determinada parcela de água pode ser definida como o tempo que passou desde a entrada dessa parcela no domínio (Zimmerman (1988) *apud* Monsen et al. (2002)). Com o passar dos anos, outra definição desse parâmetro foi desenvolvida por Delhez (2006), em que se distingue a idade da água pura da idade de constituintes presentes na água (sais, poluentes, etc.), definindo assim a idade da água como o tempo gasto para que esses constituintes deixem a região de interesse. Nessa metodologia, duas equações de advecção-difusão são resolvidas, uma (Equação 2.7) para a concentração de cada constituinte (C_i) e outra (Equação 2.8) para a concentração da idade de cada constituinte (α_i).

$$\frac{\partial}{\partial t}(HC_i) + \nabla(HuC_i) = \nabla(H\kappa\nabla C_i) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(H\alpha_i) + \nabla(Hu\alpha_i) = \nabla(H\kappa\nabla\alpha_i) + HC_i \quad (2.8)$$

Nas Equações 2.7 e 2.8, H é a profundidade, u é a velocidade média na vertical e κ é o coeficiente de difusividade. Deste modo, a idade da água de cada constituinte (a_i) é calculada por:

$$a_i = \frac{\alpha_i}{C_i} \quad (2.9)$$

Um estudo feito por Brye et al. (2013) para analisar a renovação das águas no estuário de Scheldt, localizado na fronteira da Bélgica com os Países Baixos, utilizou a metodologia proposta por Delhez (2006). Nesse estudo, Brye et al. (2013) separaram a água de renovação (“água limpa”) em três categorias diferentes: a água oriunda do oceano, a água oriunda dos

rios e a água oriunda de canais, cada uma com a sua respectiva concentração (concentração do constituinte).

Outra metodologia para calcular a idade da água é fornecida por Rosman (2017), que calcula o tempo de decaimento de uma substância passiva marcadora de idade presente na água. Para que isso seja possível, é necessário que essa substância marcadora tenha reação cinética de decaimento de primeira ordem com uma taxa de decaimento constante e positiva, não podendo ser considerados outros efeitos de perda ou ganho de massa. Essa metodologia é adotada pelo SisBaHiA[®] e pelo presente trabalho.

2.3 Escoamento residual

As ondas de maré podem se propagar de diferentes maneiras dentro de um estuário, pois seu movimento depende das características topográficas do local e dos efeitos que as mesmas sofrem devido ao atrito com as margens e o fundo (Dyer, 1973). Esses efeitos provocados pelo atrito, pelo vento e pela entrada de água doce dos rios modificam as constituintes de maré, provocando interações não-lineares que geram correntes aperiódicas, conhecidas como correntes residuais (Xu et al., 2016). Essas correntes residuais têm um papel importante no estudo da renovação das águas de corpos estuarinos, pois controlam a importação e exportação de constituintes nos mesmos, representando as mudanças na duração dos períodos de enchente e vazante que, por sua vez, podem propiciar a definição das áreas de vórtices, que representam possíveis áreas de estagnação (Lopes, 2010).

Um dos métodos mais utilizados na literatura para determinar o escoamento residual é calcular a média, ao longo de um período, das velocidades (U, V) obtidas através do modelo hidrodinâmico euleriano, como é mostrado (Lopes e Dias, 2007):

$$[U_r, V_r] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [U, V] dt \quad (2.10)$$

onde $[U_r, V_r]$ são as velocidades residuais e T é o período de maré.

Lopes e Dias (2007) estudaram a circulação residual, o tempo de residência e a dinâmica dos sedimentos na lagoa Ria de Aveiro, em Portugal, através de um modelo bidimensional de

circulação hidrodinâmica e transporte de sedimentos. Com o objetivo de comparar a influência no escoamento residual induzido por marés, pelos ventos e pela entrada de água doce dos rios, Lopes e Dias (2007) determinaram o escoamento residual através da Equação (2.10) para três cenários diferentes: no primeiro cenário, foi considerada como forçante somente a componente de maré M_2 ; no segundo e no terceiro cenário, além da componente M_2 , foram considerados também, respectivamente, uma situação de altas vazões fluviais e dois regimes de vento, um para o verão e outro para o inverno.

Xu et al. (2016) utilizaram um modelo numérico tridimensional com um módulo lagrangeano de rastrear partículas para simular as correntes residuais na baía de Xiangshan, na China. Nesse estudo, a circulação residual foi determinada a partir de dois métodos diferentes: o método euleriano, descrito pela Equação (2.10), e o método lagrangeano, que é definido por:

$$\vec{u}_r = \frac{\vec{\xi}(t_0 + T; t_0)}{T} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} \vec{u}(\vec{x}_0 + \vec{\xi}, t') dt'}{T} \quad (2.11)$$

onde \vec{u}_r é o vetor de velocidade residual, $\vec{\xi}(t_0 + T; t_0)$ representa o deslocamento resultante de um traçador, saindo da posição inicial x_0 , entre o tempo inicial t_0 até um período de maré (T) e t' representa uma escala de tempo relacionada às correntes residuais de maré.

Dessa forma, as correntes residuais calculadas por um referencial euleriano representam a velocidade resultante após um período de interesse (geralmente utiliza-se um período de maré), e as correntes residuais calculadas por um referencial lagrangeano representam o deslocamento final de um traçador após esse mesmo período. No presente trabalho, as correntes residuais são calculadas por um referencial euleriano através do SisBaHiA[®], como mostrado na Equação 2.10.

2.4 Modelagem computacional: SisBaHiA[®]¹

Corpos hídricos naturais costumam possuir dinâmicas complexas e, por esse motivo, a modelagem computacional torna-se imprescindível no auxílio à gestão destes recursos hídricos, sendo uma ferramenta que possibilita uma visão geral da dinâmica desses ambientes. Modelos

¹Texto adaptado de Rosman (2017).

calibrados, em outras palavras, modelos que apresentam resultados com boa convergência quando contrastados com dados medidos, podem auxiliar na análise de diagnósticos e prognósticos ambientais através da integração de informações espacialmente dispersas, prevendo situações através de simulações de cenários futuros, mapeando áreas de risco, entre outros.

Devido a essas vantagens, estudos com modelos numéricos em baías e estuários vêm sendo desenvolvidos. Diniz e Meyer (2004) realizaram um estudo da dispersão de poluentes nos sistemas estuarinos de Santos e São Vicente através do desenvolvimento de um modelo matemático. Cunha et al. (2006) utilizaram um modelo hidrodinâmico acoplado com um modelo de qualidade de água para simular a poluição devido ao lançamento de efluentes domésticos na Baía de Sepetiba, no estado do Rio de Janeiro. van der Wulp et al. (2016) conseguiram, através de técnicas de modelagem numérica, proporcionar uma visão geral da dinâmica de descargas dos rios, fluxo e dispersão de nutrientes na Baía de Jakarta, na Indonésia.

Neste contexto, este trabalho utiliza os modelos do SisBaHiA[®] como ferramenta de modelagem computacional para estudar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas no CEP. O SisBaHiA[®] é um sistema profissional de modelagem computacional desenvolvido pela COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Esse sistema vem sendo utilizado em uma série de estudos, projetos e trabalhos acadêmicos e tem se mostrado eficaz na modelagem de diferentes corpos hídricos. Correa (2013) analisou o efeito da eutrofização no reservatório do Rio Verde, localizado no Paraná, para diferentes condições de aporte de fósforo orgânico e inorgânico; Xavier (2002) caracterizou a circulação hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos (BA) e calculou o tempo de residência na baía para cenários distintos, verificando quais áreas, através das simulações numéricas, eram mais propícias ao acúmulo de contaminantes e detritos, e compararam com o diagnóstico ambiental existente para as mesmas; Gomes et al. (2014) utilizaram o trítio (um isótopo do hidrogênio) como traçador para simular a dispersão de radionuclídeos conservativos lançados por usinas nucleares na região de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, e os resultados obtidos com as simulações convergem com os dados medidos de trítio na região.

Existem diversos modelos contidos no SisBaHiA[®] e nas próximas subseções serão abordados de forma concisa os módulos que este trabalho utiliza.

2.4.1 Modelo hidrodinâmico

O SisBaHiA[®] possui um modelo hidrodinâmico na linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), que representa um sistema de modelagem da turbulência baseada nas técnicas de filtragem. Esse modelo admite a condição da incompressibilidade, ou seja, não há variação da massa específica da água, e a aproximação hidrostática, que reduz a quantidade de movimento na direção vertical à distribuição de pressão hidrostática.

O campo de velocidades no modelo hidrodinâmico pode ser computado de forma tridimensional (3D) ou bidimensional (2DH). O módulo 2DH determina, para cada intervalo de tempo t , as componentes $U(x, y, t)$ (na direção x) e $V(x, y, t)$ (na direção y) das velocidades médias na vertical e a posição da superfície livre $\zeta(x, y, t)$. As três equações governantes necessárias para determinar essas três incógnitas (U, V, ζ) de circulação hidrodinâmica são:

- Equação de quantidade de movimento para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\hat{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S + \tau_x^B + \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + 2\Phi_{sen\theta} V - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (2.12)$$

- Equação de quantidade de movimento para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\hat{\rho}/\rho_0)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\hat{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\hat{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S + \tau_y^B + \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) - 2\Phi_{sen\theta} U - \frac{V}{H} \sum q \end{aligned} \quad (2.13)$$

- Equação da continuidade integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = \sum q \quad (2.14)$$

Nas Equações (2.12), (2.13) e (2.14), g é a aceleração da gravidade; H é altura efetiva da coluna de água; $\hat{\rho}$ é a massa específica local do fluido e ρ_0 é uma massa específica de referência; os termos $\hat{\tau}_{xx}$, $\hat{\tau}_{xy}$, $\hat{\tau}_{yy}$ referem-se às tensões turbulentas; os termos τ_x^S e τ_y^S referem-se às tensões de atrito na superfície livre e os termos τ_x^B e τ_y^B referem-se às tensões de atrito no fundo; τ_x^E e τ_y^E referem-se às tensões devido às estruturas inseridas no escoamento; $\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}$, $\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}$ e $\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$ representam as tensões de radiação devido às ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas; Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e θ é o ângulo de latitude; $\sum q$ é o balanço dos fluxos de precipitação (q_p), evaporação (q_e) e infiltração (q_{Ia}).

Já o módulo 3D calcula os perfis de velocidade através de uma solução que é função das velocidades médias na vertical, da elevação da superfície livre e da rugosidade equivalente de fundo provenientes do módulo 2DH. Os gradientes de elevação da superfície e a tensões de atrito no fundo acoplam os módulos 3D e 2DH. O módulo 3D utiliza as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH e, em sequência, o módulo 2DH utiliza as tensões de atrito no fundo obtidas dos perfis de velocidades calculados no 3D. Assim, no módulo 3D são calculadas apenas as componentes $U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$, já que as elevações da superfície livre $\zeta(x, y, t)$ foram calculadas no 2DH.

Para utilizar o modelo hidrodinâmico é preciso estabelecer condições de contorno para o campo de velocidades e para a elevação da superfície livre da água (ζ) ao longo do contorno aberto, que é a fronteira com a região costeira adjacente. Também é preciso estabelecer condições de contorno para as fronteiras de terra, que são as margens e seções de rios no domínio da modelagem, como valores de vazão desses rios. Já as condições iniciais necessárias são os valores de ζ e as componentes U e V da velocidade para todos os nós do domínio. Além disso, é necessário fornecer valores da amplitude da rugosidade no fundo e dados de batimetria, para que possa ser possível calcular as tensões de atrito no fundo. Também é possível fornecer dados de intensidade e direção do vento no modelo para uma ou mais estações, cujas coordenadas geográficas devem ser fornecidas para o sistema.

2.4.2 Modelo de Transporte Euleriano

O modelo de transporte euleriano é utilizado para simular o transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de escalares dissolvidos ou partículas em suspensão na massa d'água. Este modelo utiliza a mesma discretização espacial e o mesmo esquema para discretização temporal do modelo hidrodinâmico e possui como equação governante:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H}(q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H}q_{Ia} + \sum R + \\ & \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left[H \left(D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial x} + H \left(D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right] + \\ & \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left[H \left(D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial x} + H \left(D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

onde $C(x, y, t)$ é a concentração do constituinte sendo transportado; C_{Ia} é o efluxo por infiltração; D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} e D_{yy} representam os coeficientes de dispersão horizontal; $\Lambda_k^2 = \alpha_k \Delta x_k$ são as escalas de largura de filtragem local na dimensão x_k , sendo que α_k são parâmetros de calibração do coeficiente de dispersão fornecida pelos termos de filtragem. O termo $\sum R$, para o caso de análise de escalares não-conservativos, representa o somatório das reações cinéticas de fontes e sumidouros consideradas, como por exemplo, reações de decaimento e sedimentação.

Neste trabalho são feitas simulações do transporte de calor com o modelo de transporte euleriano, a fim de calibrá-lo para que seja possível o seu uso no cálculo das taxas de renovação e da idade da água. Quando esse modelo é utilizado para simular o transporte de calor, o termo $\sum R$ é igual a:

$$\sum R_T = \frac{1}{H} \frac{H_n}{\rho c} \quad (2.16)$$

onde H_n é o fluxo total de calor na interface ar-água e é dado por

$$H_n = H_s - H_{sr} + H_a - H_{ar} - (H_{br} \pm H_e \pm H_c) \quad (2.17)$$

Nas Equações (2.16) e (2.17), c é o calor específico da água, H_s e H_{sr} são os fluxos de

radiação solar de ondas curtas incidentes e de ondas curtas refletidas, H_a e H_{ar} são os fluxos de radiação atmosférica de ondas longas incidentes e de ondas longas refletidas, H_{br} é o fluxo de radiação de ondas longas da água em direção à atmosfera e, por último, H_e e H_c são os fluxos de calor por evaporação e condução. O modelo consegue calcular H_n com dados de radiação solar incidente, temperatura do ar e umidade.

3 Metodologia

As simulações computacionais deste estudo foram realizadas utilizando o Modelo Hidrodinâmico e o Modelo de Transporte Euleriano do SisBaHiA[®], descritos na seção 2.4. Primeiramente, foram realizadas a calibração do Modelo Hidrodinâmico com dados medidos de elevação da superfície livre da água e a calibração do Modelo de Transporte Euleriano com dados de temperatura da água. O Modelo de Transporte Euleriano é utilizado para analisar a renovação das águas do sistema para diferentes cenários hidrodinâmicos. Esses cenários foram gerados para períodos representativos de verão e de inverno com o intuito de avaliar a influência de cada forçante (maré, vento e vazão) no processo de renovação das águas no CEP.

3.1 Domínio de modelagem

Para definir o domínio de modelagem do CEP, foi necessária a delimitação dos contornos de terra e do contorno aberto. Os contornos de terra representam os limites secos do domínio (ilhas, margens de rios, etc.) e o contorno aberto representa a delimitação entre a massa de água a ser modelada e a massa de água exterior da região costeira adjacente. O domínio da modelagem do CEP, utilizado anteriormente por Cunha et al. (2015), foi discretizado espacialmente em elementos finitos quadráticos; a malha possui 1606 elementos finitos com 7216 nós, com espaçamento variando entre 120 e 2000 *m*. Na Figura 3.1 é possível observar o domínio da modelagem com a malha utilizada e os principais rios afluentes no CEP, bem como a localização de estações (A, B, C, D, E e F) definidas no SisBaHiA[®] para auxiliar na análise dos resultados obtidos, cujas localizações visam caracterizar as diferentes zonas do CEP. A estação F foi estabelecida exatamente no ponto onde foram medidos dados de elevação da superfície livre e temperatura da água, o que possibilita a comparação entre os valores medidos e os valores obtidos com a simulação.

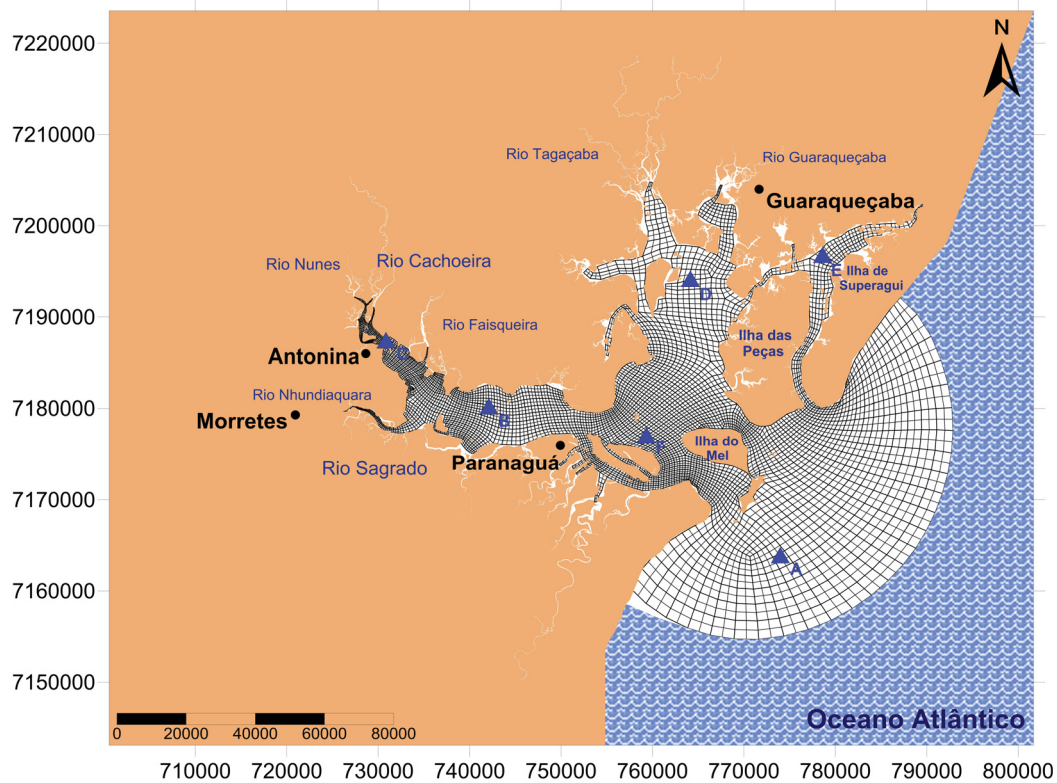


Figura 3.1: Discretização do domínio de modelagem do CEP com a localização das estações e dos principais rios afluentes.

No que se refere às condições de contorno, a velocidade normal foi considerada igual a zero nos nós que fazem parte do contorno de terra, à exceção dos nós posicionados nas desembocaduras dos rios, cujas vazões foram fornecidas ao longo do período de simulação. Nos nós que fazem parte do contorno aberto foram especificadas as elevações da superfície livre, obtidas a partir de constantes harmônicas, descritas posteriormente. Já como condição inicial, foi considerado que o campo de velocidades e o campo de elevação em relação ao nível médio do mar são iguais a zero em todos os nós do domínio. Esta condição é conhecida como “partida a frio” e por isso é necessário um tempo para que o modelo “aqueça”. Durante esse período de aquecimento, o modelo pode produzir resultados que não representam de forma realística a circulação hidrodinâmica do domínio estudado.

A batimetria do CEP, que pode ser observada através da Figura 3.2, foi reproduzida de Tamura (2017), que obteve os dados batimétricos através da digitalização das cartas Náuticas (nº 1820, 1821 e 1822) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e de dados fornecidos pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria Ambiental. Através da Figura 3.2, é possível

observar maiores profundidades no canal Sueste e no canal da Galheta, seguindo até o porto de Paranaguá.

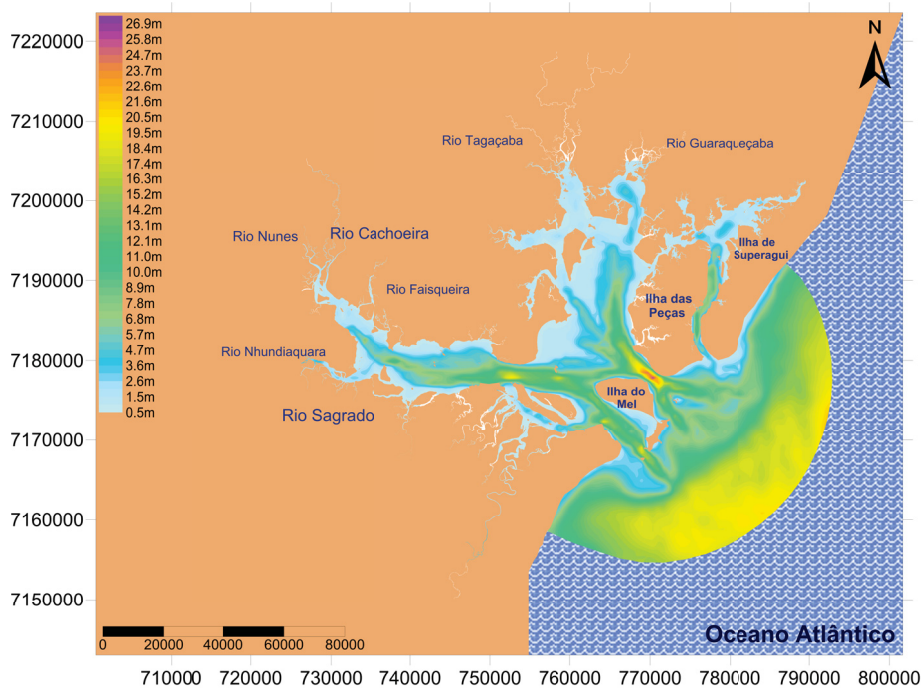


Figura 3.2: Batimetria (m) utilizada neste trabalho no domínio de modelagem do CEP.

Sabendo que a tensão de atrito atua como uma forma de dissipação da energia do sistema, a rugosidade pode ser utilizada como um modo de calibração do modelo (Roversi, 2012). O modelo hidrodinâmico define o coeficiente de atrito do fundo por meio do coeficiente de Chézy, que depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, que por sua vez é definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo (Cunha et al., 2015). Os valores de amplitude de rugosidade do fundo (ε) para o CEP, que podem ser observados através da Figura 3.3, foram retirados de Tamura (2017) e são baseados em Lamour (2007). Utilizando como referência os valores de rugosidade equivalente apresentados na Tabela 3.1, é possível observar que o leito do CEP é predominantemente composto por siltes, areias finas e médias. Também é possível observar um banco de areia predominantemente grossa logo na saída do canal da Galheta.

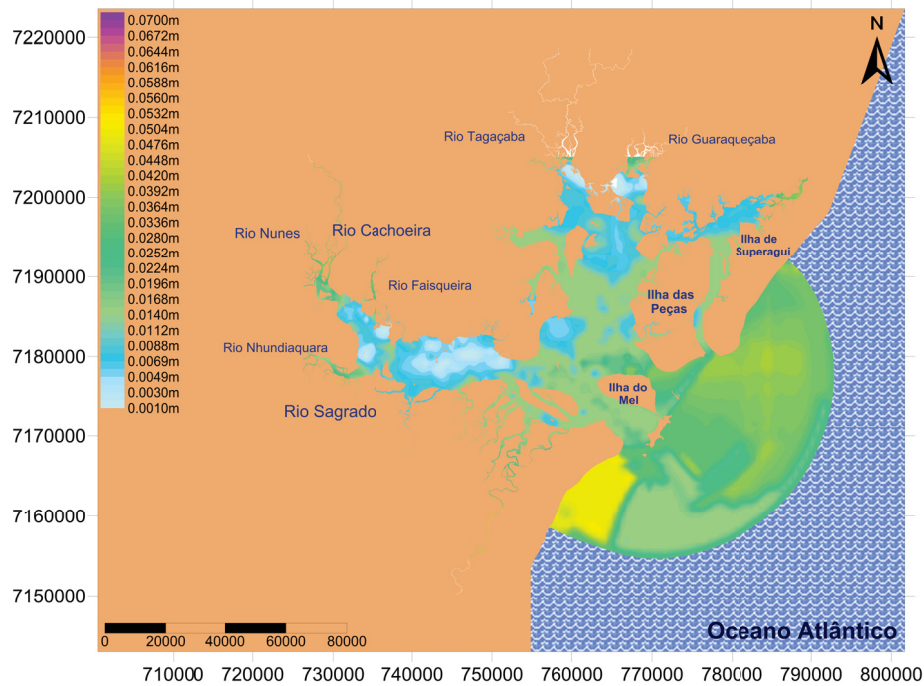


Figura 3.3: Valores da amplitude da rugosidade de fundo (m) utilizados neste trabalho no domínio de modelagem do CEP.

Tabela 3.1: Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo (ε) para leito de sedimentos com rugas e similares. Adaptado de Abbott e Basco (1989). Fonte: Rosman (2017).

| Sedimentos | Amplitude de ε (m) |
|---|-------------------------------------|
| Predominância de siltes e finos | $0,0001 m < \varepsilon < 0,0010 m$ |
| Predominância de areias finas | $0,0070 m < \varepsilon < 0,0150 m$ |
| Predominância de areias médias | $0,0100 m < \varepsilon < 0,0300 m$ |
| Predominância de areias grossas | $0,0250 m < \varepsilon < 0,0500 m$ |
| Predominância de areias muito grossas | $0,0400 m < \varepsilon < 0,0800 m$ |
| Predominância de areias com cascalho | $0,0500 m < \varepsilon < 0,1200 m$ |
| Sedimentos com vegetação | $0,0500 m < \varepsilon < 0,1500 m$ |
| Sedimentos com obstáculos (pedras, troncos, etc.) | $0,1500 m < \varepsilon < 0,4000 m$ |

3.2 Forçantes hidrodinâmicas do modelo

A fim de simular diferentes padrões de circulação existentes na região, foram definidos diferentes cenários no Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA[®], incluindo informações sobre as diferentes forçantes da circulação hidrodinâmica no CEP: a maré, as vazões fluviais e o vento.

3.2.1 Calibração dos modelos

Segundo Rosman (2017), somente após calibrar de forma adequada o modelo hidrodinâmico, é possível calibrar os modelos de transporte. A fim de calibrar esse modelo e o Modelo de Transporte Euleriano, foi feita uma simulação da circulação hidrodinâmica e do transporte de calor no CEP para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Os resultados obtidos com essa simulação foram comparados com dados medidos de elevação e temperatura da água na estação F (Figura 3.1), ambos obtidos com o correntômetro eletromagnético InterOcean S4, através do convênio da Associação dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) com o Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná (CEM-UFPR).

Para simular a circulação hidrodinâmica foram fornecidos dados de maré, vento e vazões fluviais. A maré astronômica foi calculada através das contantes harmônicas, que podem ser vistas na Tabela 3.2, obtidas por Marone e Jamiyanna (1997) e pelo Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras, disponibilizado pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). A Figura 3.4 apresenta a curva de maré prevista para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001.

Tabela 3.2: Amplitude e fase das constantes harmônicas usadas no modelo.

| Componentes | Amplitude (m) | Fase (rad) |
|-------------|-------------------|----------------|
| M_2 | 0,491 | 1,675 |
| S_2 | 0,333 | 1,763 |
| M_3 | 0,162 | 4,573 |
| M_4 | 0,160 | 4,747 |
| O_1 | 0,111 | 1,396 |
| MO_3 | 0,105 | 1,065 |
| K_1 | 0,076 | 2,409 |
| N_2 | 0,074 | 2,915 |
| MN_4 | 0,067 | 3,857 |
| MS_4 | 0,067 | 6,213 |
| MK_3 | 0,059 | 2,635 |
| mu_2 | 0,040 | 2,513 |
| Q_1 | 0,033 | 0,995 |
| L_2 | 0,029 | 1,833 |
| M_1 | 0,016 | 4,765 |

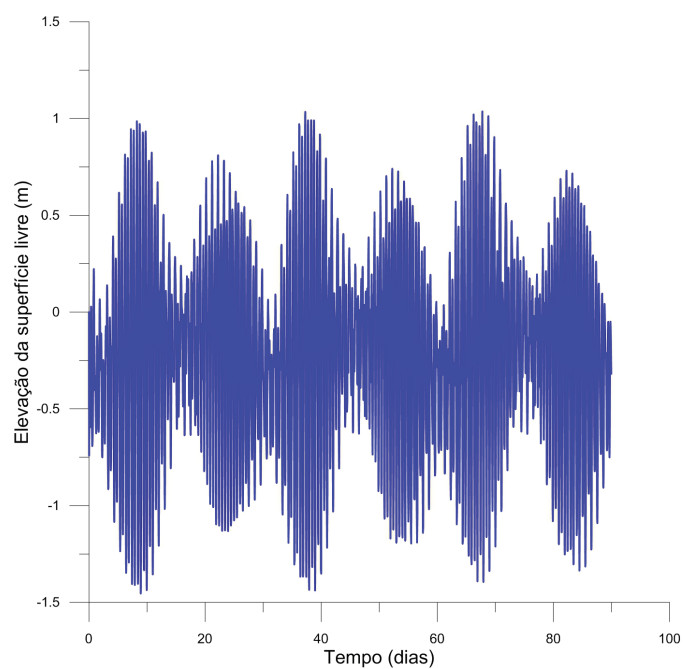


Figura 3.4: Curva de maré prevista para janeiro, fevereiro e março de 2001, obtida a partir das constantes harmônicas mostradas na Tabela 3.2.

É necessário prescrever valores de direção e intensidade do vento para que o modelo hidrodinâmico calcule as tensões na superfície livre. Os dados horários de direção e intensidade do vento utilizados na validação do modelo hidrodinâmico foram medidos nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2001, em uma estação localizada na cidade de Antonina. Esses dados foram fornecidos pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná). A Figura 3.5 apresenta a rosa de distribuição dos ventos resultante desses dados, mostrando a predominância de ventos com intensidade menor do que 3 m/s para essa região.

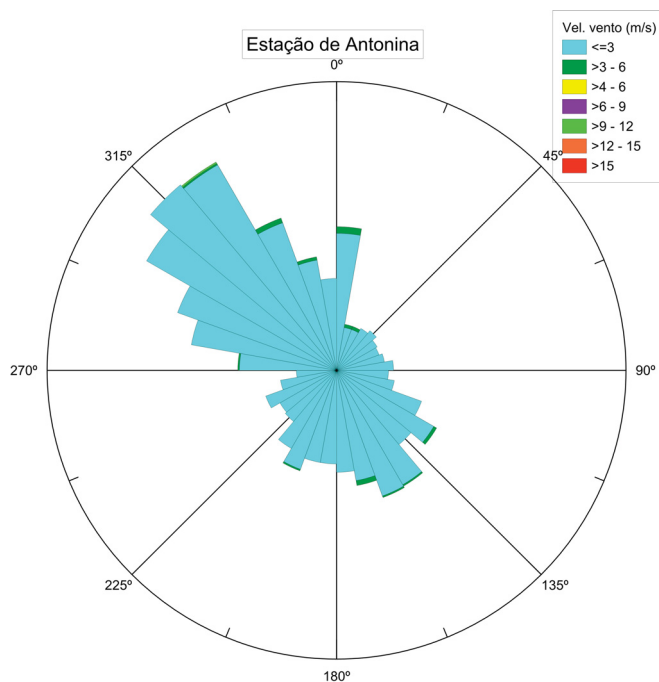


Figura 3.5: Rosa de distribuição dos ventos na estação de Antonina para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: SIMEPAR.

Foram considerados sete rios nas simulações da circulação hidrodinâmica do CEP, cujas localizações podem ser observadas na Figura 3.1. Os dados de vazões médias diárias para janeiro, fevereiro e março de 2001 foram obtidos pelo portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) para quatro desses rios: Cachoeira, Nhundiaquara, Guaraqueçaba e Tagaçaba. Devido à falta de dados, as vazões dos outros três rios (Sagrado, Nunes e Faisqueira) foram consideradas permanentes e seus valores foram retirados de Mantovanelli (1999). A Figura 3.6 apresenta as vazões desses rios, sendo possível notar que os rios Cachoeira e Nhundiaquara apresentam as maiores vazões, cujos picos nessa época chegaram a ultrapassar $110\text{ m}^3/\text{s}$.

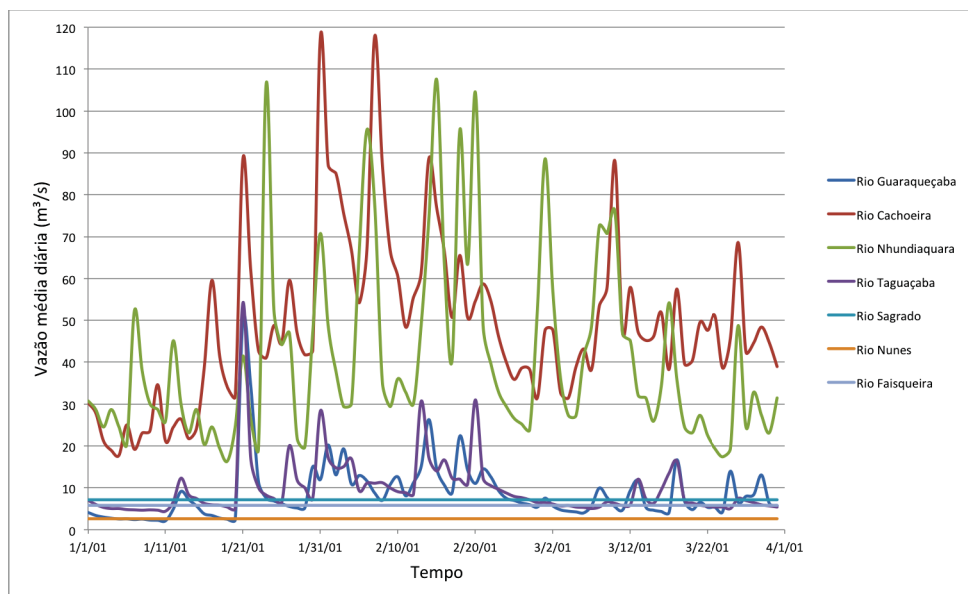
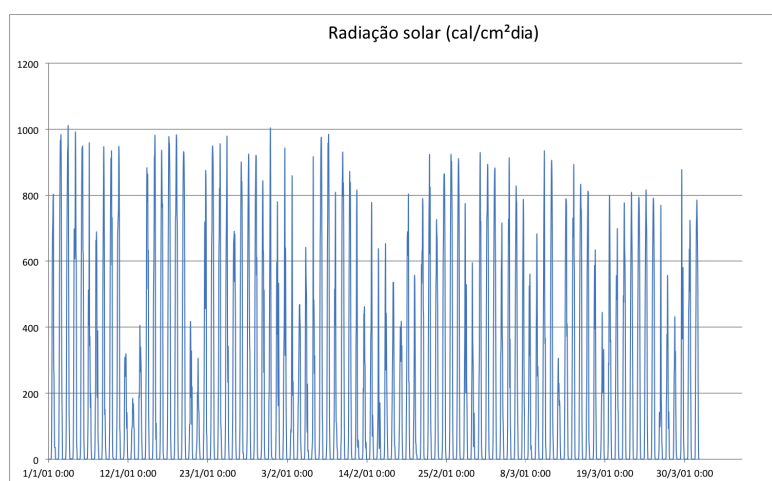


Figura 3.6: Vazão dos principais afluentes do CEP para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: HidroWeb e Mantovanelli (1999).

Para ajustar os parâmetros do modelo de transporte euleriano advectivo-difusivo, foram feitas simulações do transporte de calor utilizando dados horários de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, medidos na mesma estação em Antonina nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Esses dados também foram fornecidos pelo Instituto SIMEPAR e podem ser observados através da Figura 3.7. Para o modelo de transporte de calor foram prescritas as seguintes condições de contorno: 25°C para afluxo através da fronteira aberta (contorno de mar) e 23°C para afluxo fluvial, embasadas em Silveira et al. (2012).



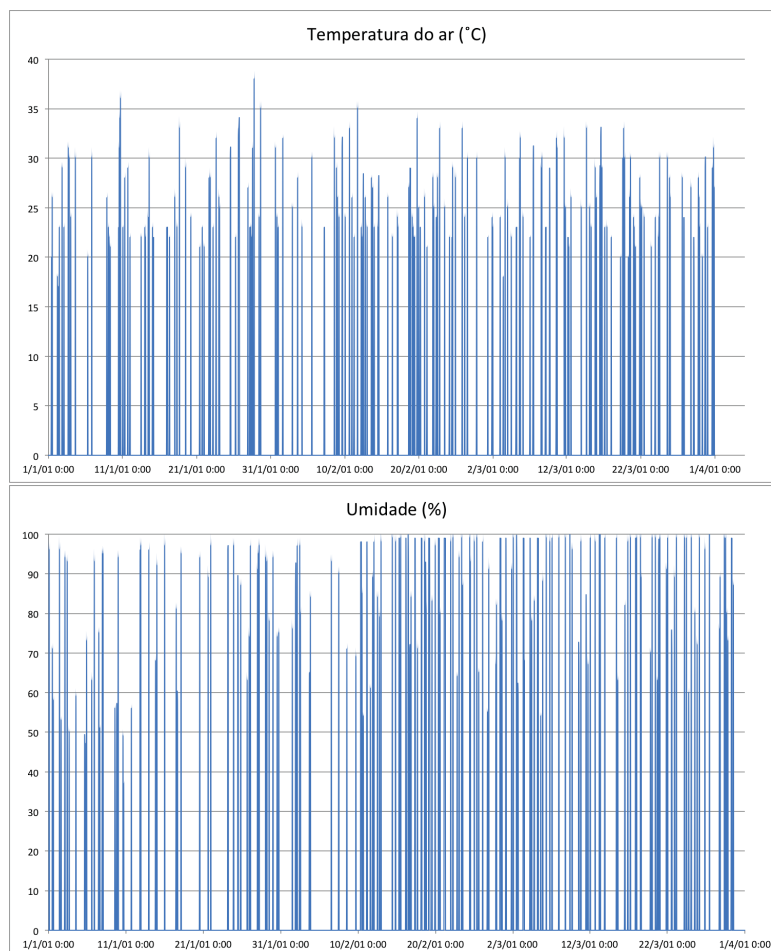


Figura 3.7: Variação temporal da radiação solar, temperatura e umidade na estação de Antonina para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2001. Fonte: SIMEPAR.

3.2.2 Cenários hidrodinâmicos

Após a adequada calibração do modelo hidrodinâmico e do modelo de transporte euleriano, pôde-se criar cenários para simular diferentes padrões de circulação existentes na região do CEP. Através da criação desses cenários é possível simular diferentes condições ambientais, o que viabiliza a identificação das forçantes que mais influenciam a renovação das águas desse ambiente estuarino. Neste trabalho, os cenários foram definidos a fim de identificar dentre as forçantes - maré, vazão e vento - qual teria maior influência na circulação hidrodinâmica e, conseqüentemente, no processo de renovação das águas do CEP. A seguir são apresentados os cenários hidrodinâmicos utilizados:

- **Cenário 1:** considera somente a maré como forçante da circulação hidrodinâmica para

um período característico de verão (**Cenário 1-V**) e para um período característico de inverno (**Cenário 1-I**); não são considerados os efeitos causados pelo vento e pelas vazões fluviais.

Período da simulação do Cenário 1-V: 01/01/2009 a 31/03/2009.

Período da simulação do Cenário 1-I: 01/06/2009 a 31/08/2009.

- **Cenário 2:** considera a maré e as vazões fluviais como forçantes da circulação hidrodinâmica para um período característico de verão (**Cenário 2-V**) e para um período característico de inverno (**Cenário 2-I**); não são considerados efeitos causados pelo vento.

Período da simulação do Cenário 2-V: 01/01/2009 a 31/03/2009.

Período da simulação do Cenário 2-I: 01/06/2009 a 31/08/2009.

- **Cenário 3:** considera a maré, as vazões fluviais e o vento como forçantes da circulação hidrodinâmica para um período característico de verão (**Cenário 3-V**) e para um período característico de inverno (**Cenário 3-I**).

Período da simulação do Cenário 3-V: 01/01/2009 a 31/03/2009.

Período da simulação do Cenário 3-I: 01/06/2009 a 31/08/2009.

As vazões fluviais utilizadas nos Cenários 2 e 3 para os rios Cachoeira, Nhundiaquara, Guaraqueçaba e Tagaçaba consistem em uma média da série histórica (1994-2009) de dados de vazões diárias obtidos no portal HidroWeb. Foram considerados as vazões nos meses de janeiro, fevereiro e março para os Cenários 2-V e 3-V e nos meses de junho, julho e agosto para os Cenários 2-I e 3-I. Já as vazões utilizadas para os rios Sagrado, Nunes e Faisqueira foram retiradas de Mantovanelli (1999), que fornece vazões médias permanentes para o verão (utilizadas nos cenários 2-V e 3-V) e para o inverno (utilizadas nos cenários 2-I e 3-I). A Figura 3.8 apresenta as vazões utilizadas tanto para o verão como para o inverno.

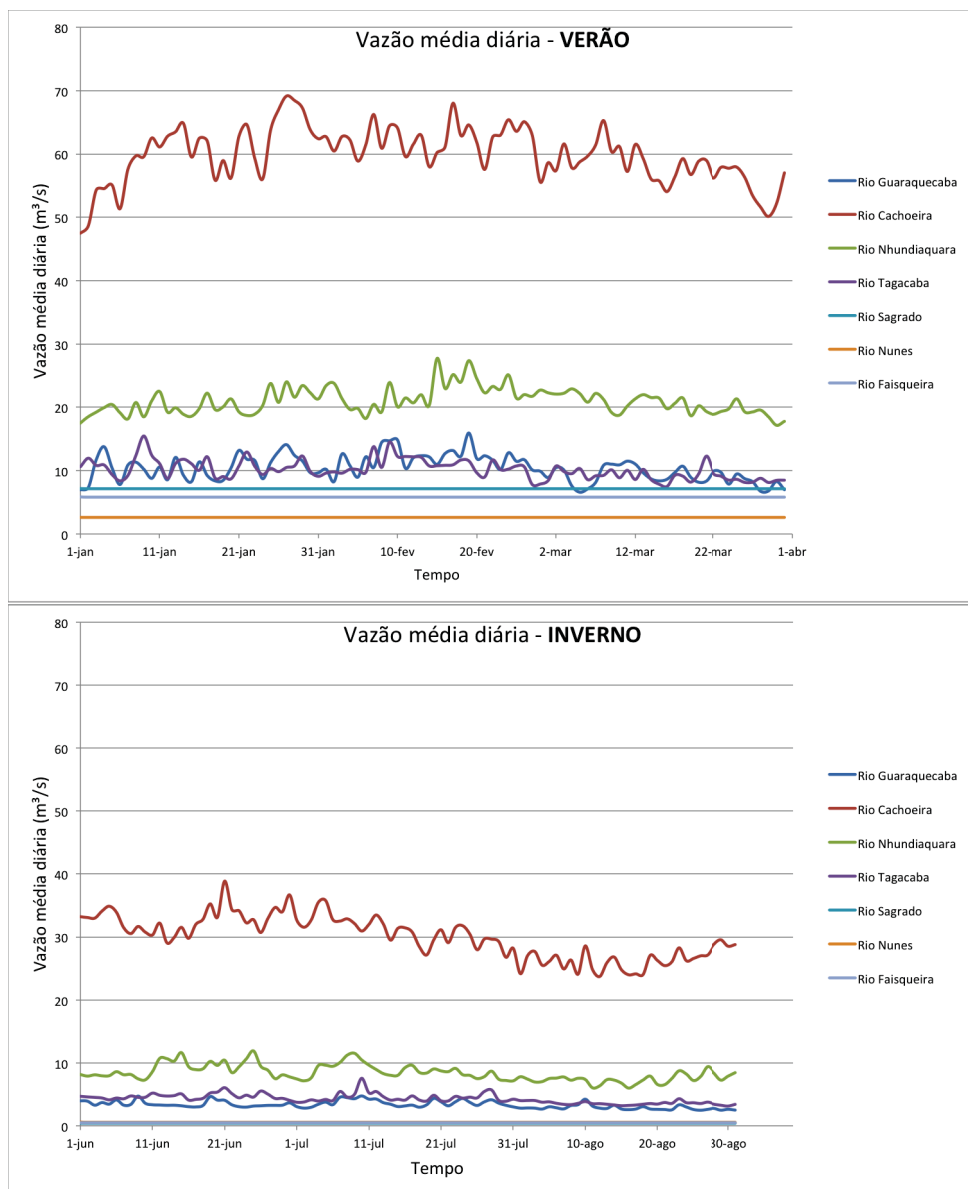


Figura 3.8: Vazão média dos principais afluentes do CEP para os meses de janeiro, fevereiro e março (verão) e para os meses de junho, julho e agosto (inverno). Fonte: HidroWeb e Mantovanelli (1999).

Os regimes de vento característicos de verão e inverno foram obtidos utilizando o modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF), que é um modelo de previsão numérica do tempo e de simulação atmosférica de mesoescala, no qual são resolvidas as equações de Euler para um fluido compressível e não-hidrostático (Powers et al., 2008). O WRF utilizou como condições iniciais e de contorno dados do modelo operacional *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e dados do Projeto *Reanalysis*. Esse projeto é coordenado pelo NCEP junto com o *National Center for Atmospheric Research*

(NCAR) e visa produzir um registro retroativo de análises globais de campos atmosféricos desde 1948. Também foram utilizados dados de topografia e uso do solo do Serviço Geológico dos Estados Unidos com detalhamento horizontal de $900\text{ m} \times 900\text{ m}$, aproximadamente.

Para que fosse possível analisar mais detalhadamente a região do CEP foi realizada uma regionalização dinâmica, uma vez que os dados do Projeto *Reanalysis* são apresentados com um espaçamento de grade 200 km , aproximadamente, em 17 níveis verticais e intervalo temporal de seis horas. Na regionalização hidrodinâmica a resolução da grade foi ampliada através da solução das equações do modelo em grades sucessivas, de resolução crescente, onde foram empregadas três grades aninhadas (Figura 3.9), com as seguintes configurações de espaçamento horizontal: grade externa - $100\text{ km} \times 100\text{ km}$; grade intermediária - $25\text{ km} \times 25\text{ km}$; grade interna $5\text{ km} \times 5\text{ km}$. Foram utilizados 50 níveis verticais, sendo que o primeiro nível acima da superfície estava a cerca de 20 m de altura, de forma a permitir uma representação adequada da camada limite superficial atmosférica.

Foram utilizadas parametrizações no WRF em seis categorias de processos físicos: parametrização de radiação atmosférica de onda longa e de onda curta, que fornece o aquecimento ou o resfriamento atmosférico devido ao fluxo divergente radiativo e ao balanço de calor na superfície; parametrização de camada limite planetária (CLP), que representa os fluxos verticais em pequena escala devido aos transportes turbulentos em toda a CLP; parametrização de camada limite superficial para determinar a troca de calor, umidade e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera; parametrização de nuvens tipo *cumulus*, para representar fluxos verticais devido aos movimentos ascendentes, descendentes e compensadores fora das nuvens em escalas não resolvíveis pelas grades do modelo (apenas para as grades externa e intermediária); parametrização de microfísica de nuvens, que inclui a solução explícita dos processos de vapor d'água, nuvens e precipitação; e parametrização do modelo de solo, que fornece propriedades físicas do substrato, como temperatura e umidade (Powers et al. (2008) *apud* Carvalho (2015)).

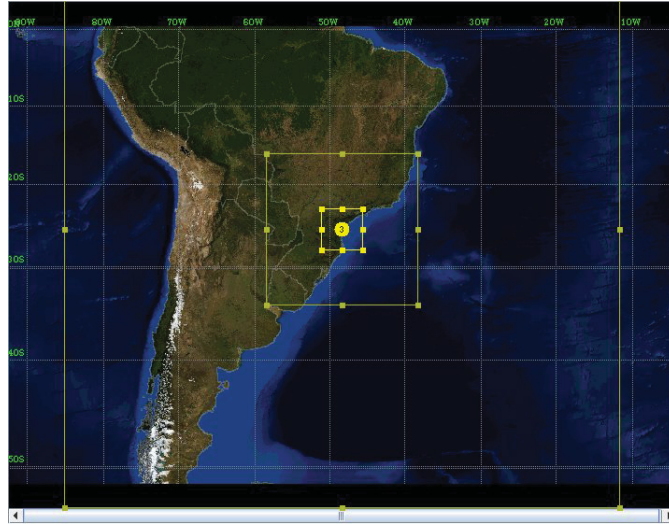


Figura 3.9: Representação dos domínios do WRF utilizados na regionalização dinâmica.

As simulação ocorreram entre 01/01/2009 a 31/03/2009 para período verão e entre 01/06/2009 a 31/08/2009 para período de inverno, sendo feitas de forma bidirecional, ou seja, os valores calculados na grade maior foram utilizados como condição de contorno na grade menor e, posteriormente, os pontos da grade maior receberam o valor médio dos pontos da grade menor (Carvalho, 2015). Os resultados das simulações tiveram um registro horário do vento na altura de 10 m na grade interna (espaçamento de 5 km x 5 km), que possui 150 pontos (“estações”) que podem ser observados na Figura 3.10. Assim, cada simulação forneceu dados horários de intensidade e direção do vento para cada uma dessas 150 estações.

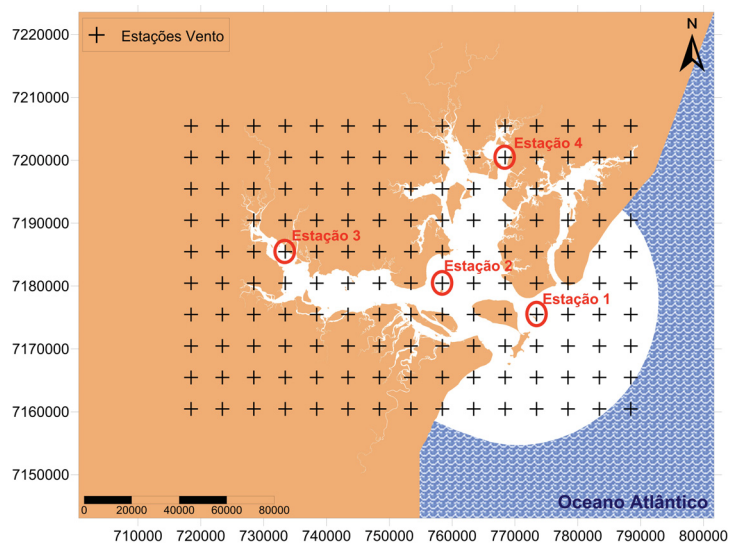


Figura 3.10: Localização das 150 estações obtidas com a grade mais interna do WRF.

As estações circuladas em vermelho na Figura 3.10 foram escolhidas para apresentar a visualização da distribuição dos ventos na região do CEP. As rosas de distribuição dos ventos para essas estações podem ser vistas na Figura 3.11 para o período de verão e na Figura 3.12 para o período de inverno.

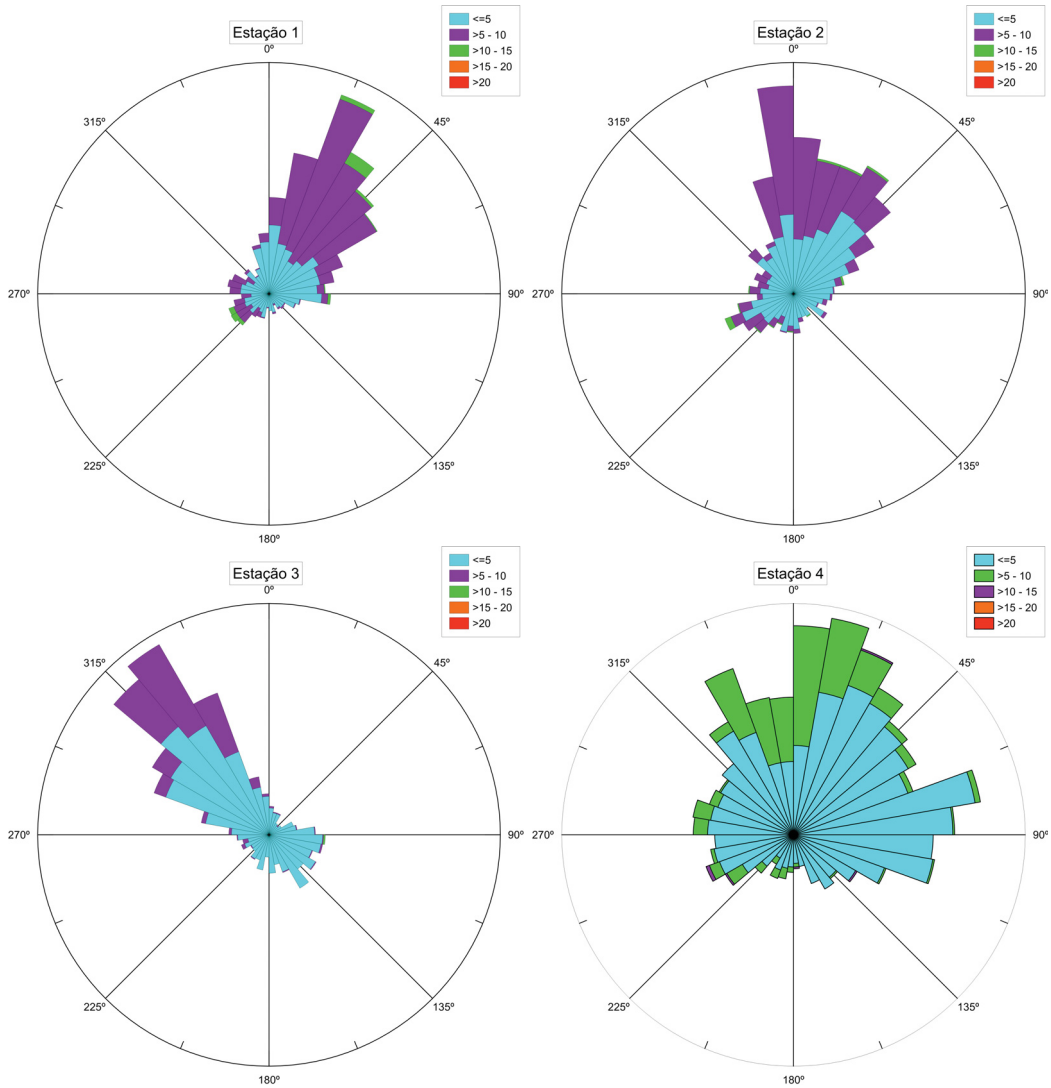


Figura 3.11: Rosa da distribuição dos ventos gerados com o WRF para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2009 nas Estações 1, 2, 3 e 4.

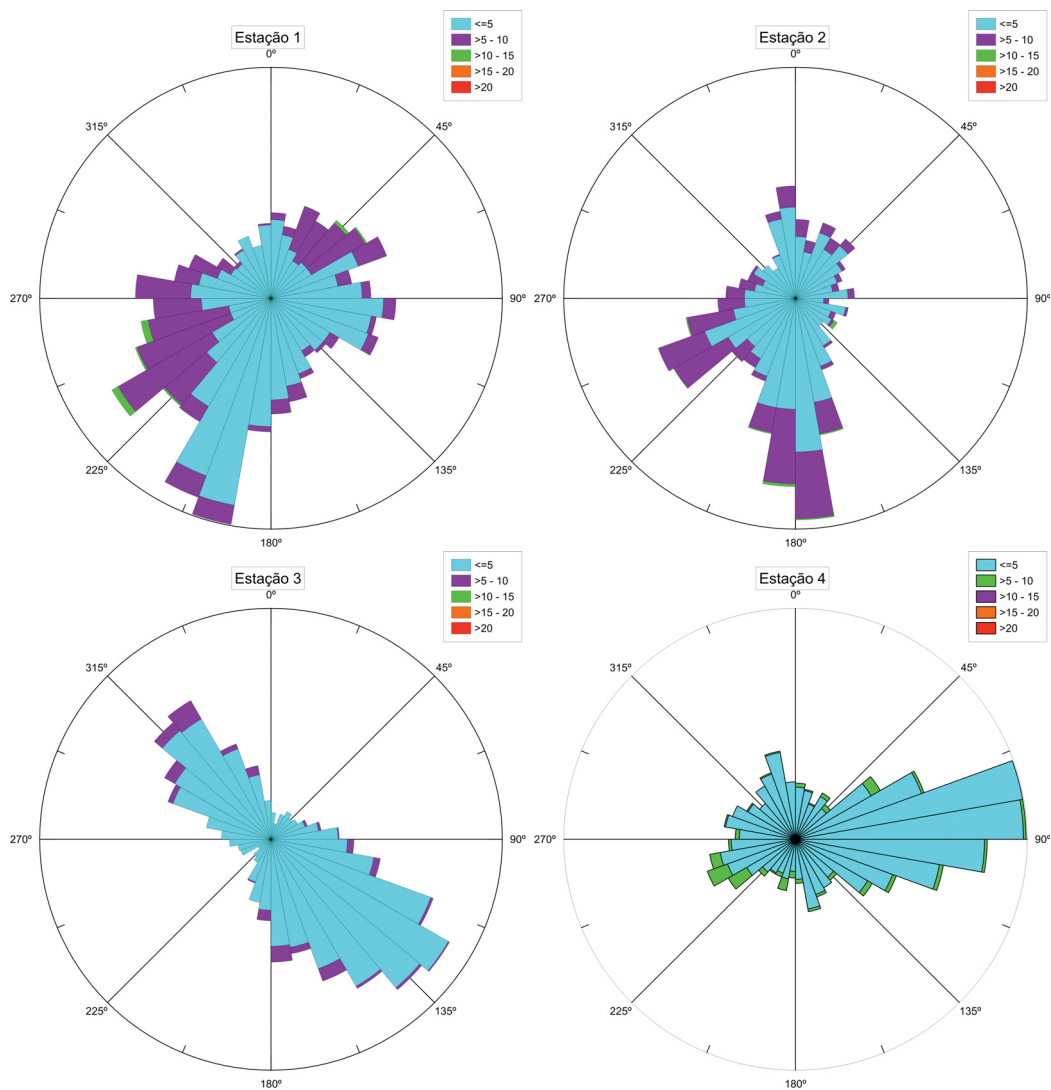


Figura 3.12: Rosa da distribuição dos ventos gerados com o WRF para os meses de junho, julho e agosto de 2009 nas Estações 1, 2, 3 e 4.

3.3 Cálculo das taxas de renovação, idade da água e escoamento residual

O cálculo das taxas de renovação e da idade da água foram feitos através do modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®], que pode ser visto na seção 2.4. As simulações foram feitas para os cenários hidrodinâmicos criados a fim de avaliar qual a influência que as forçantes hidrodinâmicas - maré, vento e vazão - possuem na renovação das águas do CEP.

Para calcular as taxas de renovação foi simulado o transporte de um constituinte conservativo

ao longo do domínio pelos processos de advecção e difusão. No instante inicial foi atribuída uma concentração desse constituinte igual a zero a toda água dentro do domínio de interesse, ou seja, atribuiu-se a essa água um índice de renovação de 0%. Já para as águas que entram no domínio pelos afluentes e pela fronteira aberta, foram atribuídos valores de concentração iguais a 100, equivalendo ao índice de renovação de 100%. Assim, conforme as águas iniciais com índice 0% foram se misturando com as águas novas afluentes com índice 100%, e que a mistura foi sendo expelida do domínio, as águas foram se renovando. A Figura 3.13 ilustra a condição inicial adotada nas simulações da taxa de renovação das águas do CEP.

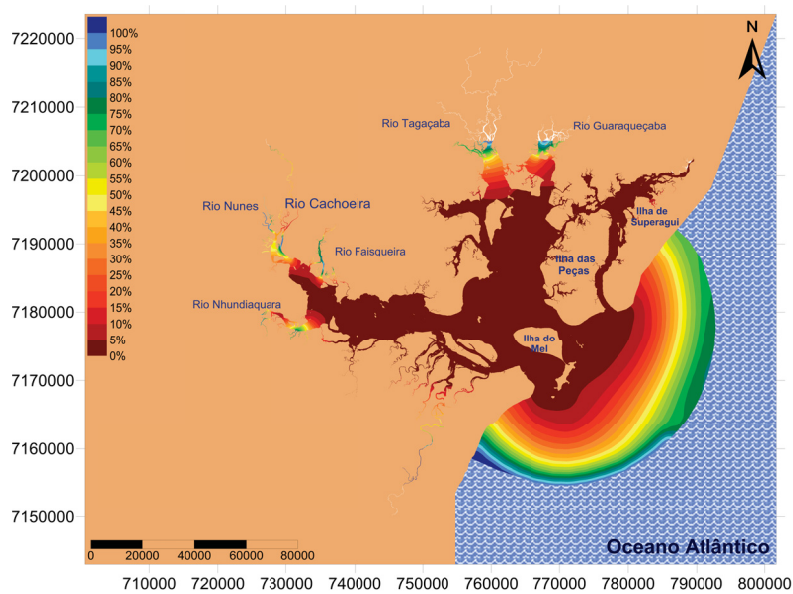


Figura 3.13: Condição inicial utilizada para as simulações, no Cenário 2-V, da taxa de renovação das águas no CEP.

Já para calcular a idade da água, foi simulado o transporte de um constituinte não-conservativo ao longo do domínio. Assim, a idade da água é o tempo de decaimento de uma substância passiva marcadora de idade presente na água. É obrigatório que essa substância sofra uma reação cinética de decaimento de primeira ordem com taxa constante $k > 0$, sem outros efeitos de ganho ou perda de massa, como pode ser observado na Equação (3.1):

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (3.1)$$

que possui solução analítica igual a

$$C(t) = C_0 \exp(-kt) \quad \therefore \quad t = \frac{-\ln(C/C_0)}{k} \quad (3.2)$$

sendo que k pode ser representado por

$$k = -\frac{\ln(0,1)}{T_{90}} \quad (3.3)$$

Nas Equações (3.1) e (3.2), a concentração da substância traçadora no instante inicial é definida por C_0 e no instante t é definida por $C(t)$. Já na Equação (3.3), T_{90} é o tempo requerido para o decaimento de 90% dessa substância e, de acordo com Rosman (2017), é recomendado utilizar um valor de T_{90} próximo da duração da modelagem.

Sabendo-se o valor de C_0 e $C(t)$, é possível determinar o tempo de decaimento decorrido entre o instante inicial e o instante do registro de C , que é a “idade da água” nesse instante, ou seja, por quanto tempo a água está no volume considerado. Portanto, o valor da função Idade da Água $I_A(x, y, t)$ é uma média da mistura de águas com diferentes idades, dada por:

$$I_A(x, y, t) = \frac{-\ln(C(x, y, t)/C_0)}{k} \quad (3.4)$$

Assim, foi admitido no instante inicial que a concentração dessa substância é igual a 1 em todo o domínio e I_A , conseqüentemente, é igual a zero. De forma análoga ao modelo anterior, as águas afluentes possuíam concentrações iguais a 1 e $I_A = 0$. À medida que as águas iniciais e as águas novas, ambas com $I_A = 0$, foram se misturando e sendo transportadas no domínio, a concentração da substância foi diminuindo devido ao processo de decaimento e, por conseqüência, o valor de I_A foi se tornando diferente em cada ponto. A Figura 3.14 ilustra a condição inicial adotada nas simulações da idade das águas do CEP.

Neste trabalho, as correntes residuais são calculadas por um referencial euleriano, como foi mostrado na Equação (2.10), para dois períodos (T) distintos: para um período de aproximadamente $25 h$, a fim de avaliar os efeitos da maré nas correntes residuais; e para um período de 1 semana, a fim de avaliar os efeitos de outras forçantes do modelo, como as vazões fluviais, por exemplo.

O passo de tempo (Δt) adotado neste trabalho, tanto no modelo hidrodinâmico como no

modelo de transporte euleriano, foi de 10 s com número de Courant médio de 0,3 e máximo de 2,9. Como condição inicial, foram definidos os campos de velocidade e elevação iguais a zero. Já para os coeficientes de dispersão horizontal foram atribuídos os seguintes valores:

$$D_{xx} = 5 \text{ m}^2/\text{s}, D_{yy} = 5 \text{ m}^2/\text{s} \text{ e } D_{xy} = D_{yx} = 5 \text{ m}^2/\text{s}.$$

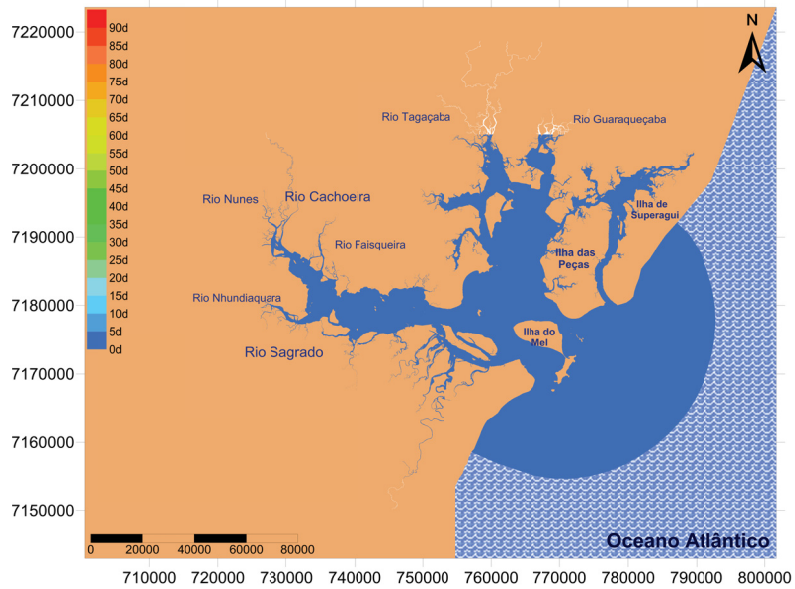


Figura 3.14: Condição inicial utilizada para as simulações, no Cenário 2-V, da idade das águas do CEP.

4 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações do modelo hidrodinâmico e de transporte euleriano do SisBaHiA[®], para os diferentes períodos simulados. Primeiramente é apresentada uma comparação entre os dados obtidos com os modelos e os dados medidos nos meses de fevereiro e março de 2001, a fim de comprovar o bom desempenho do modelo em simular a circulação hidrodinâmica e o transporte de constituintes no CEP. Em seguida são apresentados os resultados obtidos através dos cenários representativos de verão e inverno, onde são analisados, em maior detalhe, as taxas de renovação e a idade da água obtidas para cada um dos cenários. Por fim, são apresentados os resultados dos campos de velocidades residuais para um dos cenários hidrodinâmicos.

4.1 Calibração e ajuste dos modelos

Com o objetivo de calibrar o modelo hidrodinâmico, foi realizada uma simulação da circulação hidrodinâmica no CEP no período de 01/01/2001 até 31/03/2001, totalizando um período de 90 dias. Os resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico nessa simulação são apresentados na Figura 4.1, onde são vistos os dados do nível d'água simulados e medidos na estação F (ver localização na Figura 3.1) e o erro relativo entre ambos (eixo secundário). A Figura 4.2 mostra o campo de velocidades no CEP no instante $t = 3214800 s$, que é em uma preamar de sizígia, indicado pela seta na Figura 4.1. Já a Figura 4.3 apresenta uma comparação entre as amplitudes e as fases das principais constantes harmônicas, obtidas através dos módulos de análise e previsão de marés do SisBaHiA[®]. As constantes M_2 , S_2 , M_3 e M_4 foram selecionadas para as comparações, por serem estas as mais significativas no CEP de acordo com Camargo e Harari (2003).

De acordo com Rosman (2017), espera-se que o modelo hidrodinâmico, após adequada calibração, produza erros relativos menores do que 5%. Analisando a Figura 4.1, é possível notar um bom desempenho do modelo, produzindo um erro relativo médio em torno de 2%.

Através da Figura 4.3, observa-se a forte dominância das componentes M_2 e S_2 , que somam juntas mais de 50% da altura da maré no CEP, sendo que a componente mais dominante, M_2 ,

apresentou o menor erro observado, cujo valor é igual a 1,3%. No entanto, o modelo gerou fases menores para as quatro constantes harmônicas e produziu diferentes amplitudes principalmente nas baixa-mares. Possivelmente essas diferenças foram causadas devido às discrepâncias entre os dados batimétricos implementados no modelo e a batimetria real no período da simulação, além do fato de os dados de direção e intensidade do vento terem sido fornecidos somente em um local (estação de Antonina) para toda a malha.

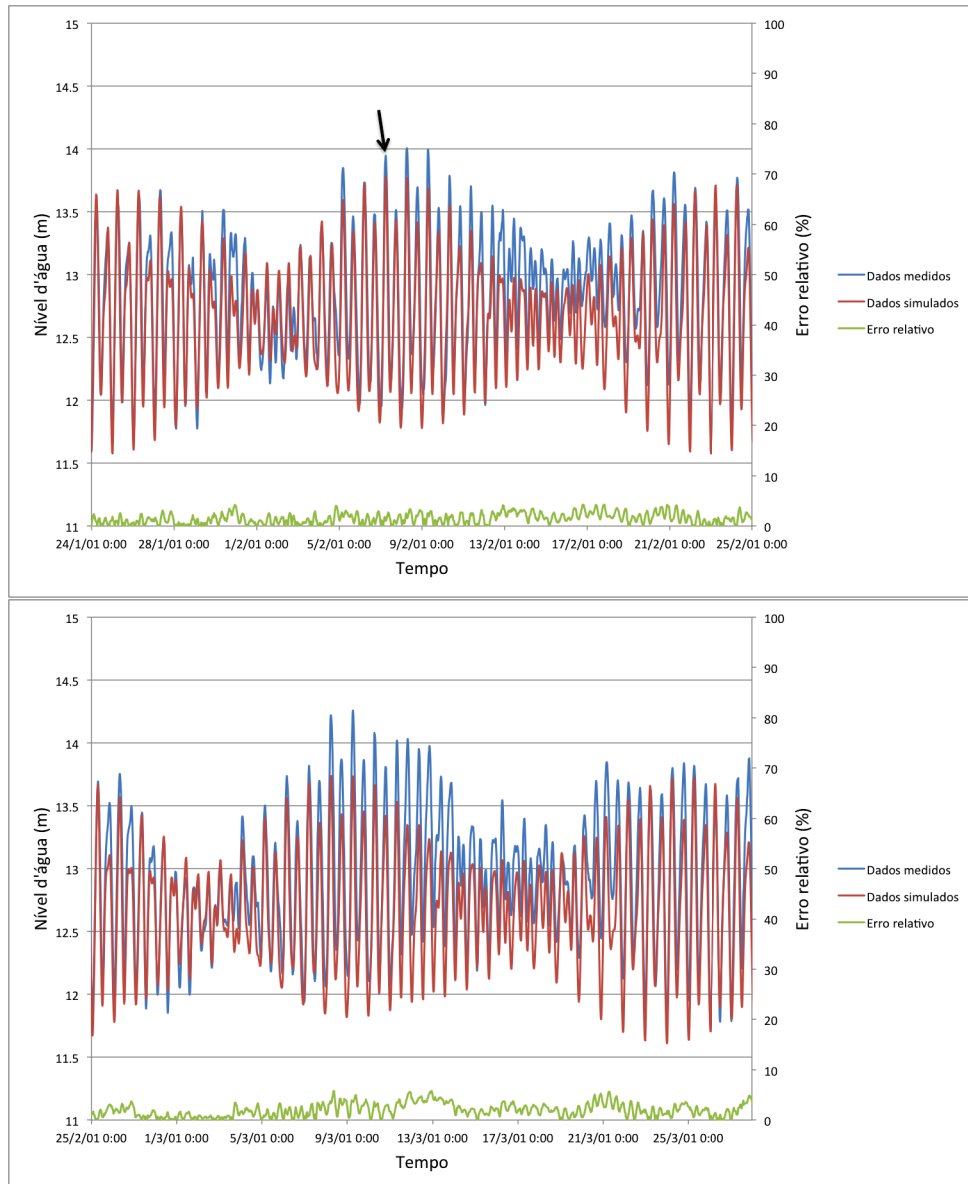


Figura 4.1: Comparação entre os valores da elevação simulados pelo SisBaHiA[®] e medidos na estação F.

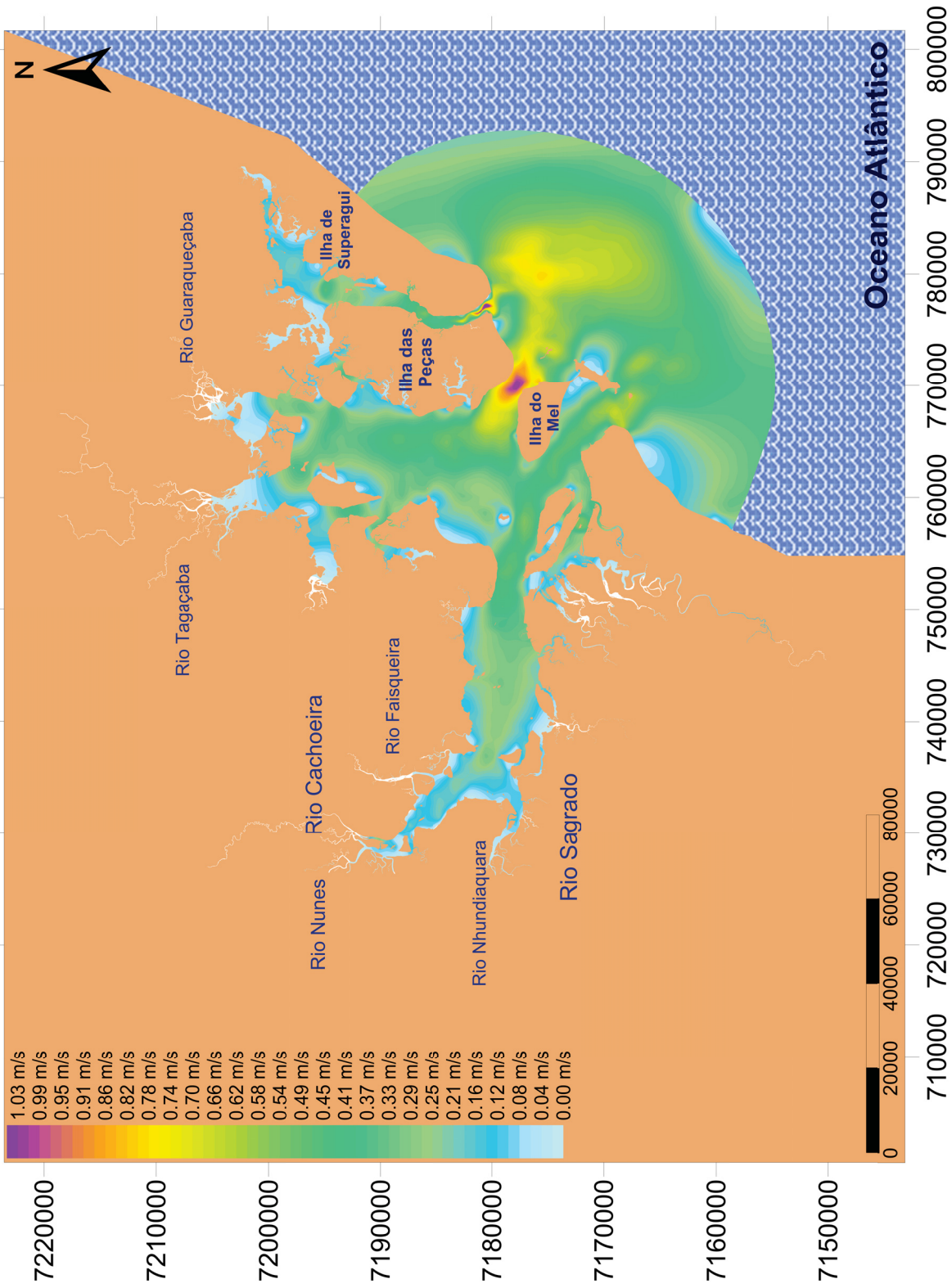


Figura 4.2: Campo de velocidades em um instante de maré de sizígia ($t = 3214800$ s).

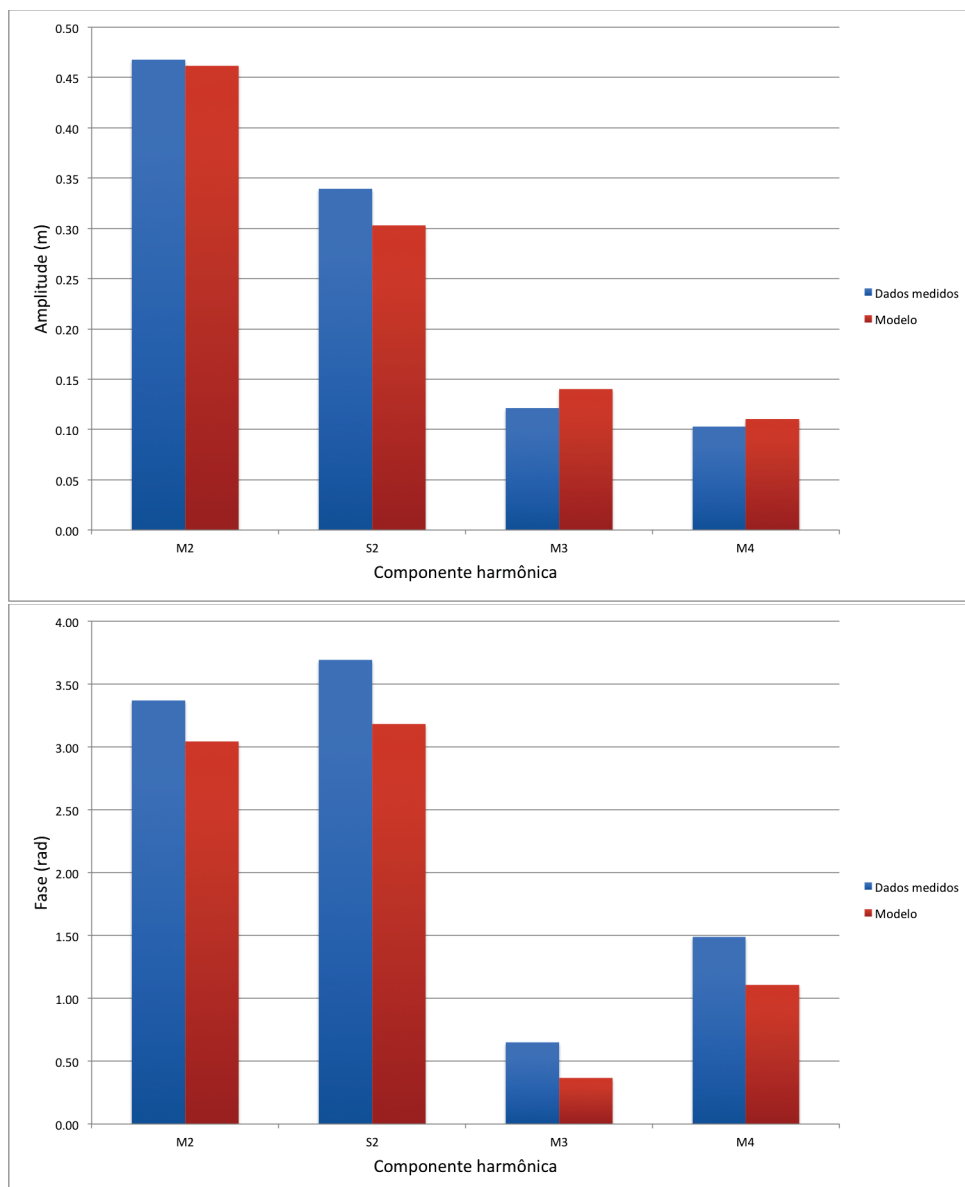


Figura 4.3: Comparação entre as amplitudes e as fases das principais componentes harmônicas, obtidas a partir dos dados de elevação medidos e simulados pelo SisBaHiA[®] na estação F.

Uma simulação do transporte de calor (temperatura) nas águas do CEP foi realizada para esse mesmo período, de 01/01/2001 a 31/03/2001, a fim de ajustar os parâmetros do modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®], principalmente os coeficientes de dispersão horizontal, considerando que os mesmos podem ser calculados a partir da velocidade de atrito, mas possuem parâmetros de calibração que podem ser ajustados. A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre os dados de temperatura da água medidos e obtidos pelo modelo de transporte, bem como o erro relativo entre eles (eixo secundário).

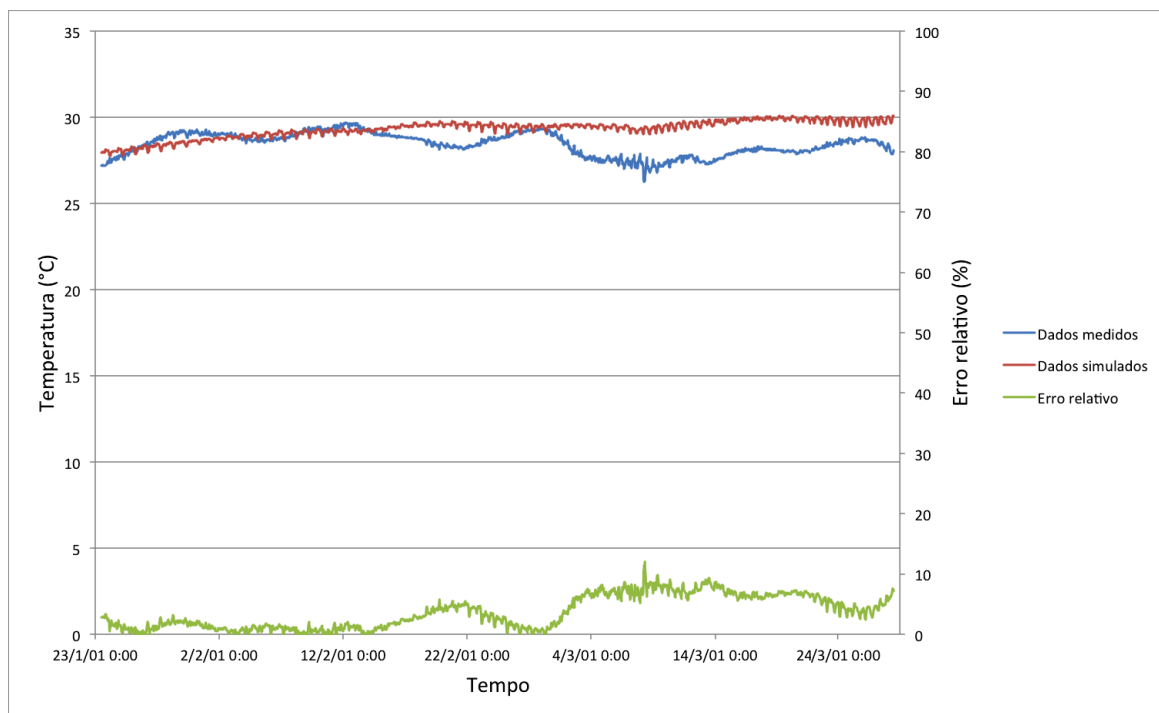


Figura 4.4: Comparação entre os valores de temperatura da água simulados pelo SisBaHiA[®] e medidos na estação F.

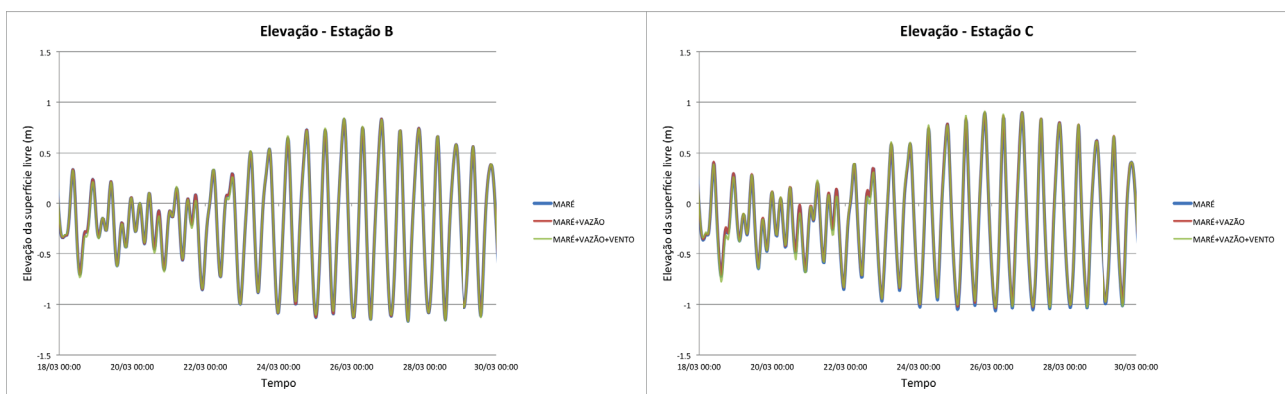
Segundo Rosman (2017), deve-se esperar do modelo de transporte coerências entre valores medidos e valores calculados semelhantes às verificadas no modelo hidrodinâmico, visto que o modelo de transporte recebe como dados de entrada os resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico, e, portanto, a confiabilidade dos resultados gerados pelo modelo de transporte é intrinsecamente função da qualidade dos resultados hidrodinâmicos. Através da Figura 4.4, observa-se que os erros relativos gerados pelo modelo de transporte não ultrapassam os 15%, produzindo um erro médio em torno de 4%.

As diferenças entre os valores de temperatura da água medidos e gerados pelo modelo podem dever-se ao fato da temperatura ter sido medida aproximadamente na metade da coluna da água, enquanto que o SisBaHiA[®] calcula uma temperatura média para toda a coluna d'água. Outro provável motivo é que, assim como o vento, os valores de radiação solar foram fornecidos somente em um local, sendo distribuídos uniformemente em toda a malha, o que não acontece efetivamente no sistema estuarino devido ao tamanho do CEP.

4.2 Cenários hidrodinâmicos: período representativo de verão (1-V, 2-V e 3-V)

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico e com o modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®] através de simulações realizadas para os cenários representativos de verão, no período de 01/01/2009 a 31/03/2009.

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam para as estações B, C, D, E e F, cujas localizações podem ser vistas na Figura 3.1, a elevação e as componentes E-W e N-S, respectivamente, para os três cenários representativos de verão — Cenário 1-V (só considera a maré como forçante), Cenário 2-V (considera a maré e as vazões fluviais como forçantes) e Cenário 3-V (considera a maré, as vazões fluviais e o vento como forçantes). Para cada um dos cenários são mostrados os resultados obtidos para um período de quadratura e um período de sizígia. Analisando os resultados é possível perceber que, para 12 dias de simulação, não há significativas diferenças entre os cenários, principalmente na estação F, visto que a mesma não está sob direta influência das vazões fluviais. Já nas outras estações — B, C, D e E — é possível notar diferenças suaves entre os 3 cenários.



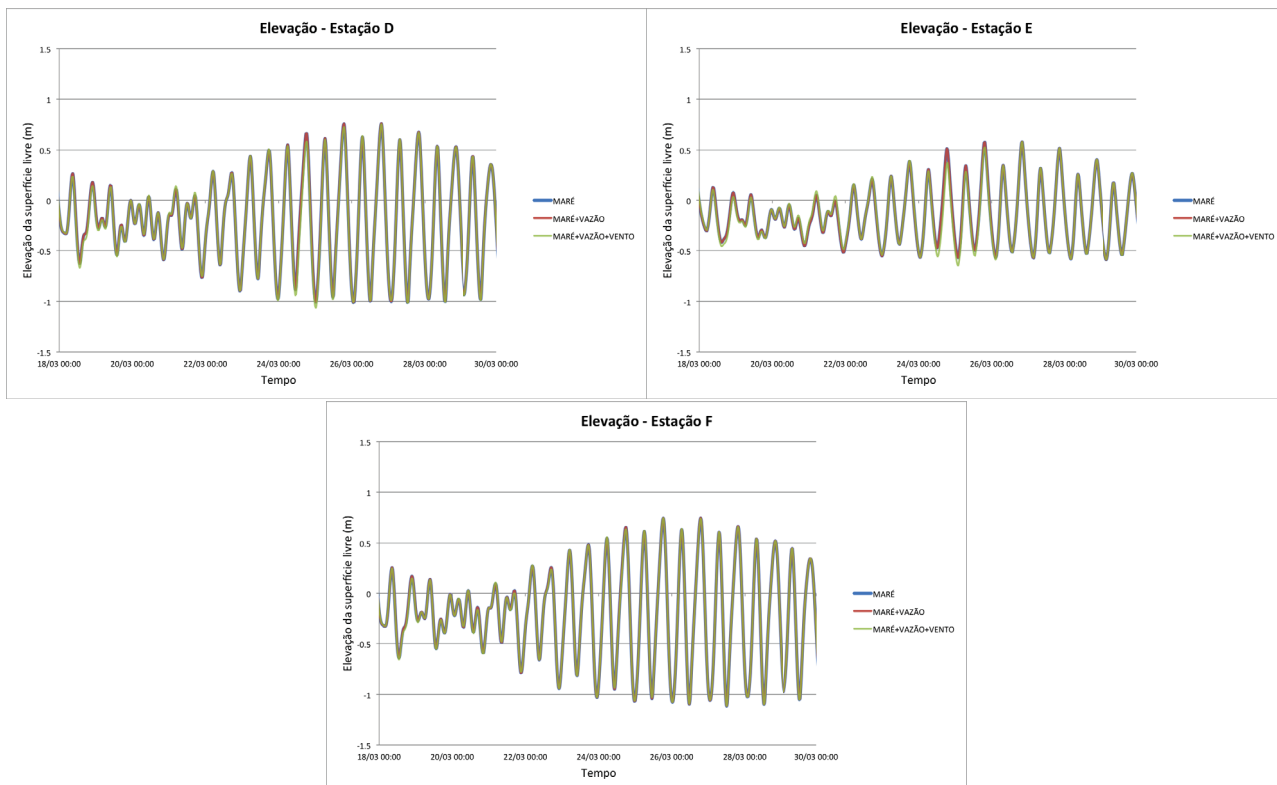
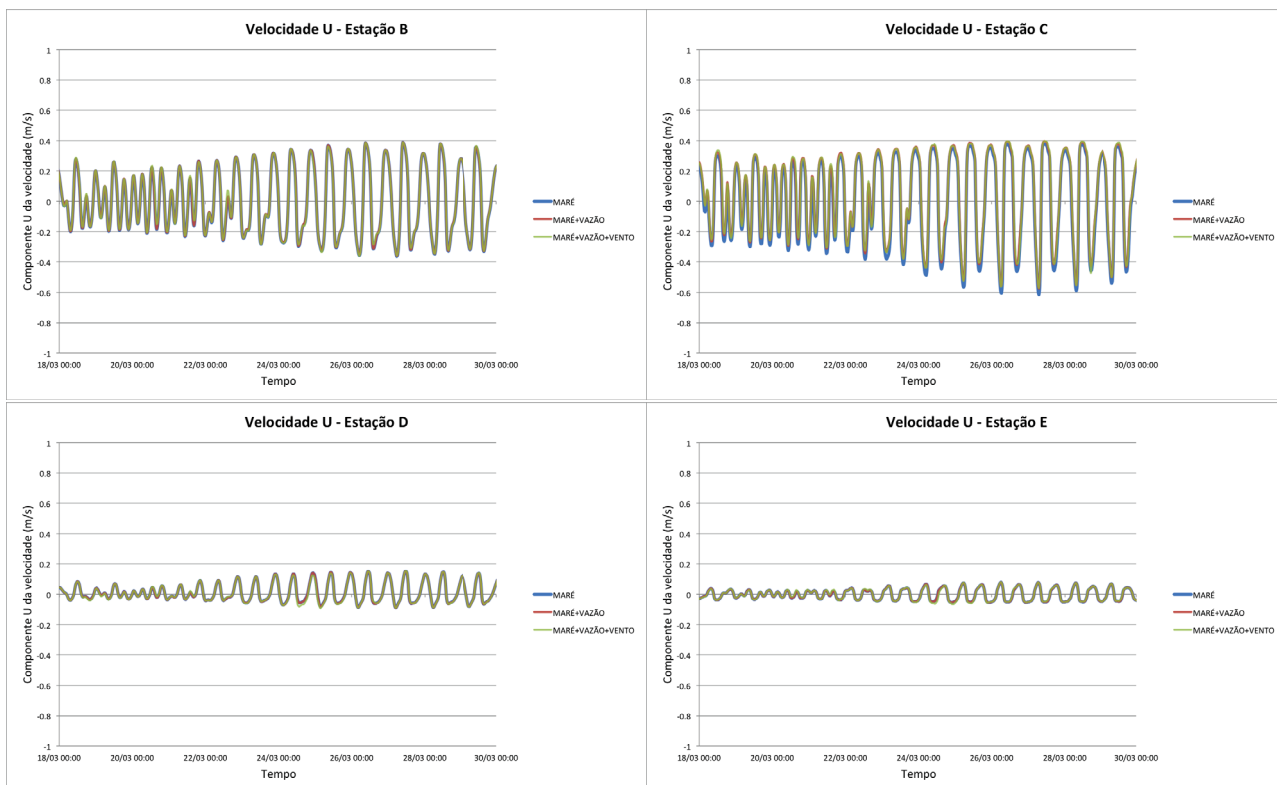


Figura 4.5: Valores de elevação obtidos com o SisBaHiA[®] nas estações E e F para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V).



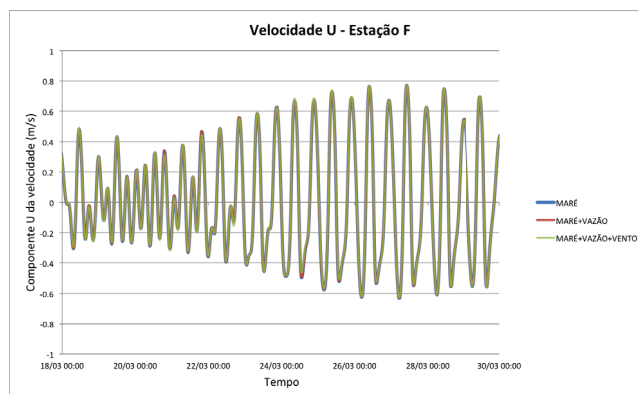


Figura 4.6: Valores da componente E-W da velocidade obtidos com o SisBaHiA[®] para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V).

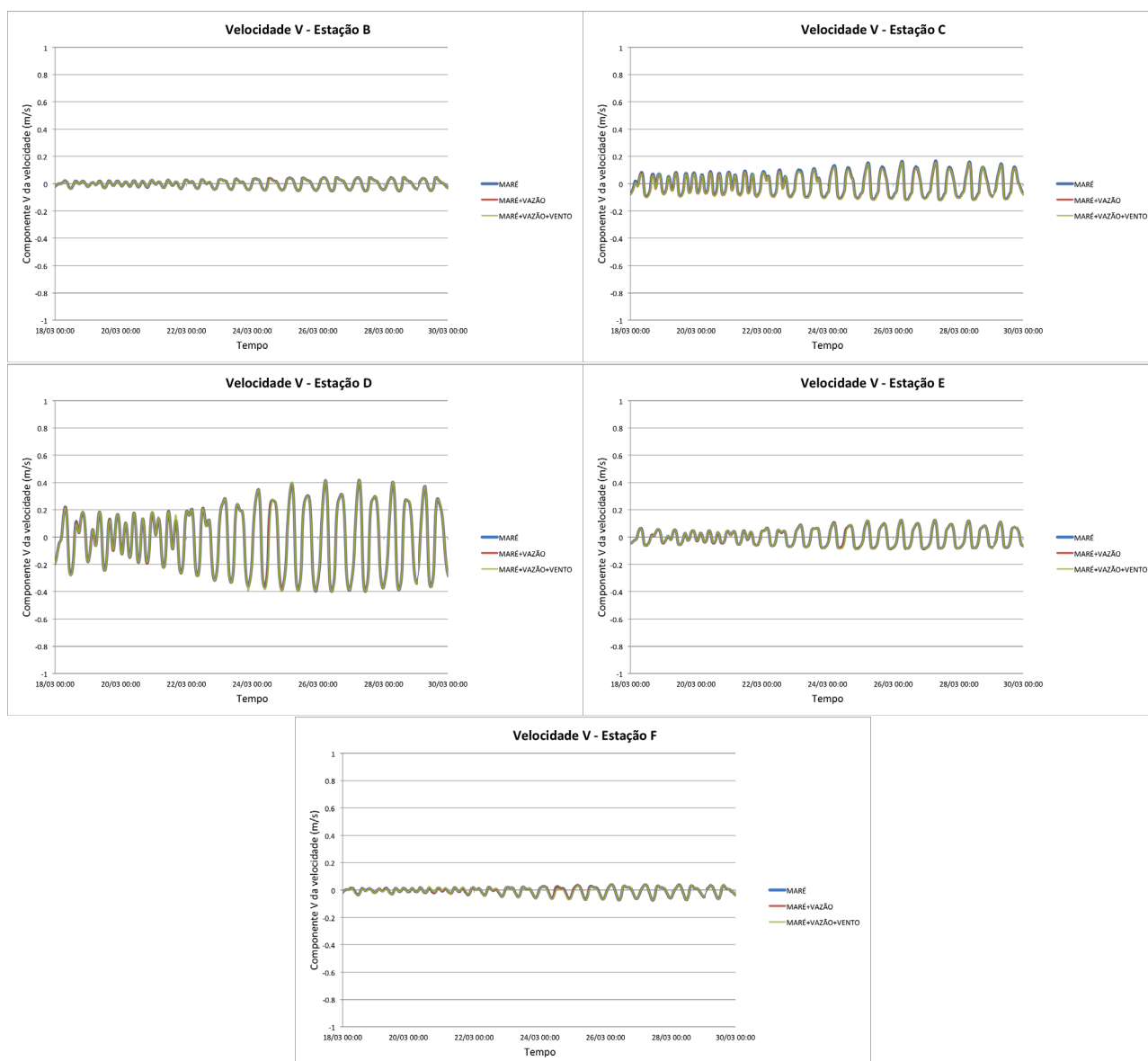


Figura 4.7: Valores da componente N-S da velocidade obtidos com o SisBaHiA[®] para os cenários de verão (1-V, 2-V e 3-V).

4.2.1 Taxas de renovação

A Figura 4.8 apresenta as evoluções temporais da taxa de renovação nas estações A, B, C, D, E e F. Já a Figura 4.9 apresenta, para os Cenários 1-V, 2-V e 3V, as taxas de renovação para todo o domínio do CEP após três meses de simulação. Analisando a Figura 4.8, observa-se que, dentre todas as estações, as águas são renovadas mais lentamente no Cenário 1-V, onde o único fluxo de água “nova” é pela fronteira aberta, dado que não são consideradas as vazões fluviais. Isso também pode ser visto na Figura 4.9, que mostra taxas de renovação significativamente menores no interior do CEP para o Cenário 1-V do que nos demais cenários (Cenário 2-V e 3-V). Essa diferença é menos visível na estação A, fato esperado visto que a mesma está localizada mais próxima da fronteira aberta e está sob pouca influência das vazões fluviais.

Considerando os Cenários 2-V e 3-V, é possível afirmar que a vazão fluvial é a forçante mais importante no processo de renovação das águas no interior CEP, dado que a inclusão da mesma no modelo promove um significativo aumento das taxas de renovação quando comparado com o Cenário 1-V, que considera somente a maré. Além disso, as diferenças entre as taxas de renovação no cenário sem (Cenário 2-V) e com (Cenário 3-V) o vento são mínimas, o que mostra a pouca influência que o vento possui sobre o processo de renovação das águas do CEP quando comparado com as vazões fluviais.

Na estação C, as diferenças entre os Cenários 2-V e 3-V são muito pequenas, pois essa estação é a que se localiza mais próxima da foz dos principais rios do CEP, o que torna a ação do vento irrelevante quando comparada com a ação dos rios. Nas estações D, E e F, nota-se que o vento provoca uma ligeira desaceleração no processo de renovação, o que pode indicar que o vento esteja provocando o empilhamento da água para dentro do estuário. Através da Figura 4.9, observa-se que a região da baía dos Pinheiros (estação E) e a região da baía de Paranaguá (estação F) apresentam processos de renovação um pouco mais lentos do que as demais áreas, condição que é ligeiramente acentuada com a inclusão do vento, indicando a possibilidade dessas áreas serem de estagnação e estarem sob o efeito de empilhamento causado pelo vento.

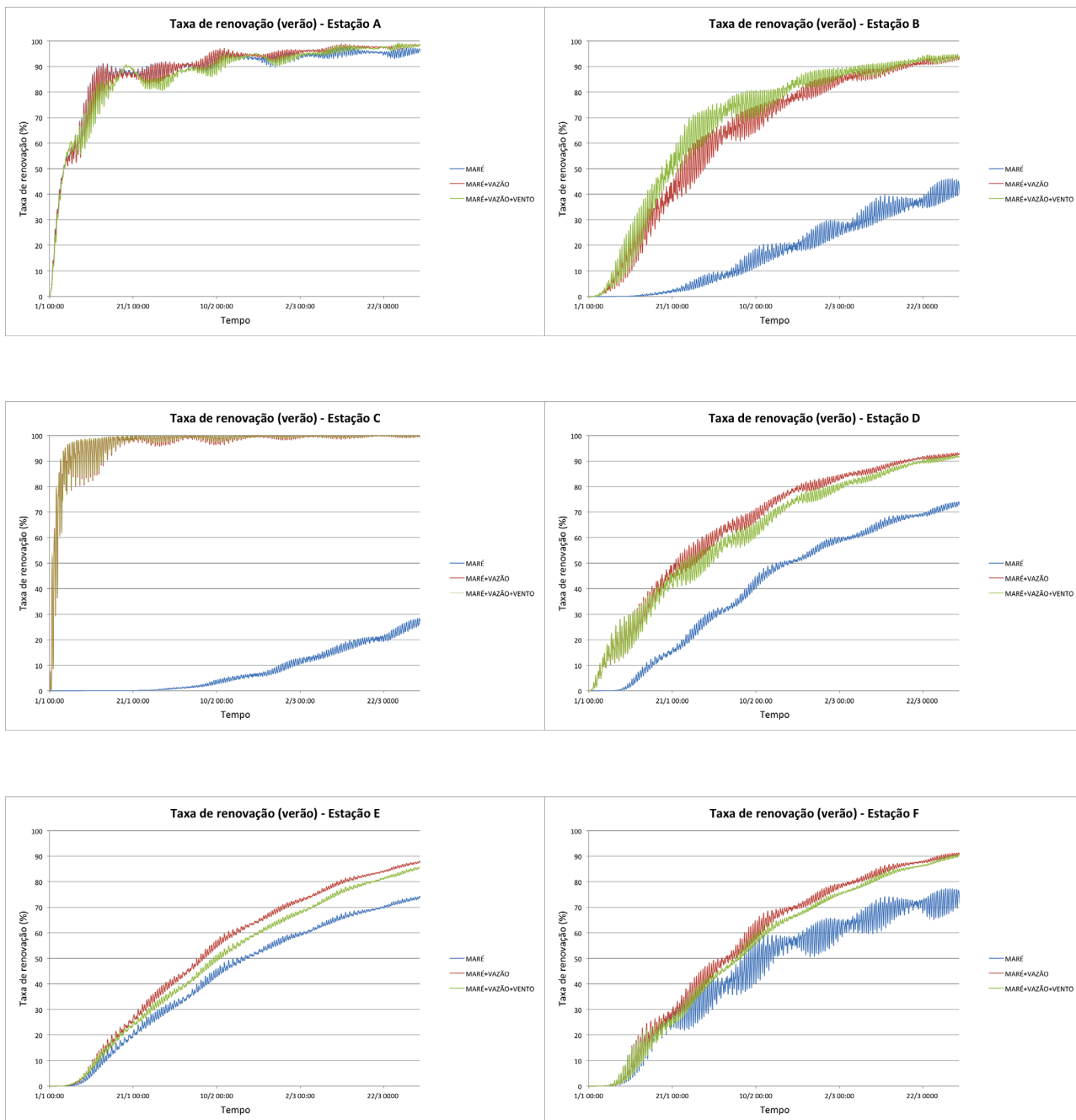


Figura 4.8: Evolução temporal das taxas de renovação para os cenários 1-V (maré), 2-V (maré e vazão) e 3-V (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1).

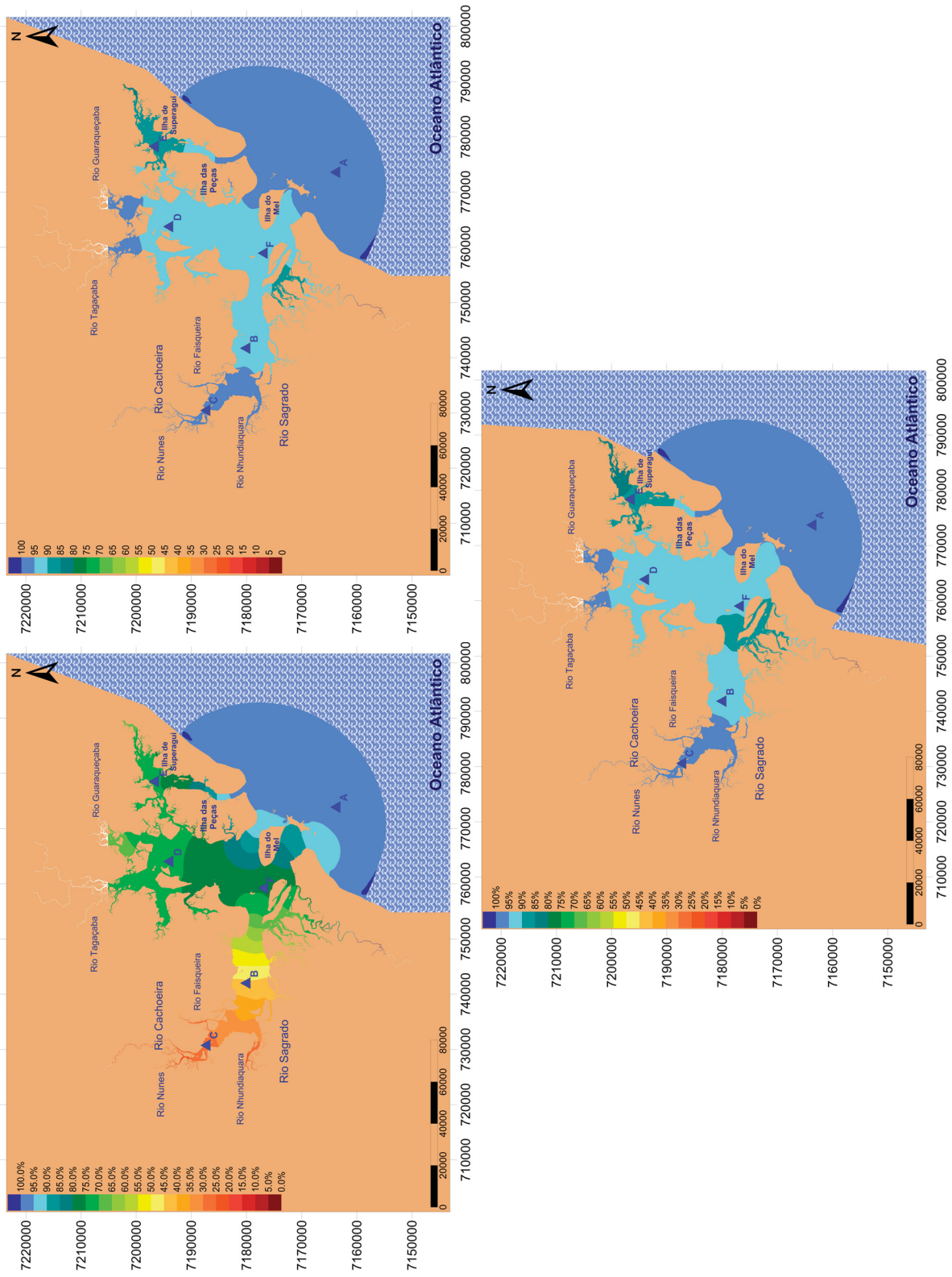


Figura 4.9: Taxas de renovação para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-V (imagem em cima, à esquerda), 2-V (imagem em cima, à direita) e 3-V (imagem embaixo).

4.2.2 Idade da água

Aqui são apresentados os resultados obtidos da idade da água no CEP, que são complementares aos resultados das taxas de renovação, já que a circulação hidrodinâmica utilizada para calcular esses dois parâmetros é a mesma. A Figura 4.10 apresenta as evoluções temporais da idade da água em cada uma das seis estações. Já a Figura 4.11 apresenta, para os Cenários 1-V, 2-V e 3V, a idade das águas de todo o domínio do CEP após três meses de simulação.

Analisando a Figura 4.10, observa-se que as águas apresentam idades maiores no Cenário 1-V, ou seja, as águas nesse cenário ficam por mais tempo sem serem renovadas. Assim como constatado nos resultados das taxas de renovação, é possível observar que as vazões fluviais possuem o papel de maior influência no processo de troca das águas nas estações B, C e D. Na estação E, nota-se a inclusão do vento aumenta a idade da água na região, o que reafirma a possibilidade da região está sob efeito de empilhamento do vento. Já na estação F, a inclusão das vazões fluviais e do vento pareceu não causar mudanças, já que a diferença entre a evolução temporal da idade da água entre os cenários é mínima.

Analogamente aos resultados produzidos referentes às taxas de renovação, a região da baía dos Pinheiros (estação E) e a região da baía de Paranaguá (estação F) apresentam idades ligeiramente maiores do que as demais áreas, indicando mais uma vez que essas regiões são possíveis áreas de estagnação.

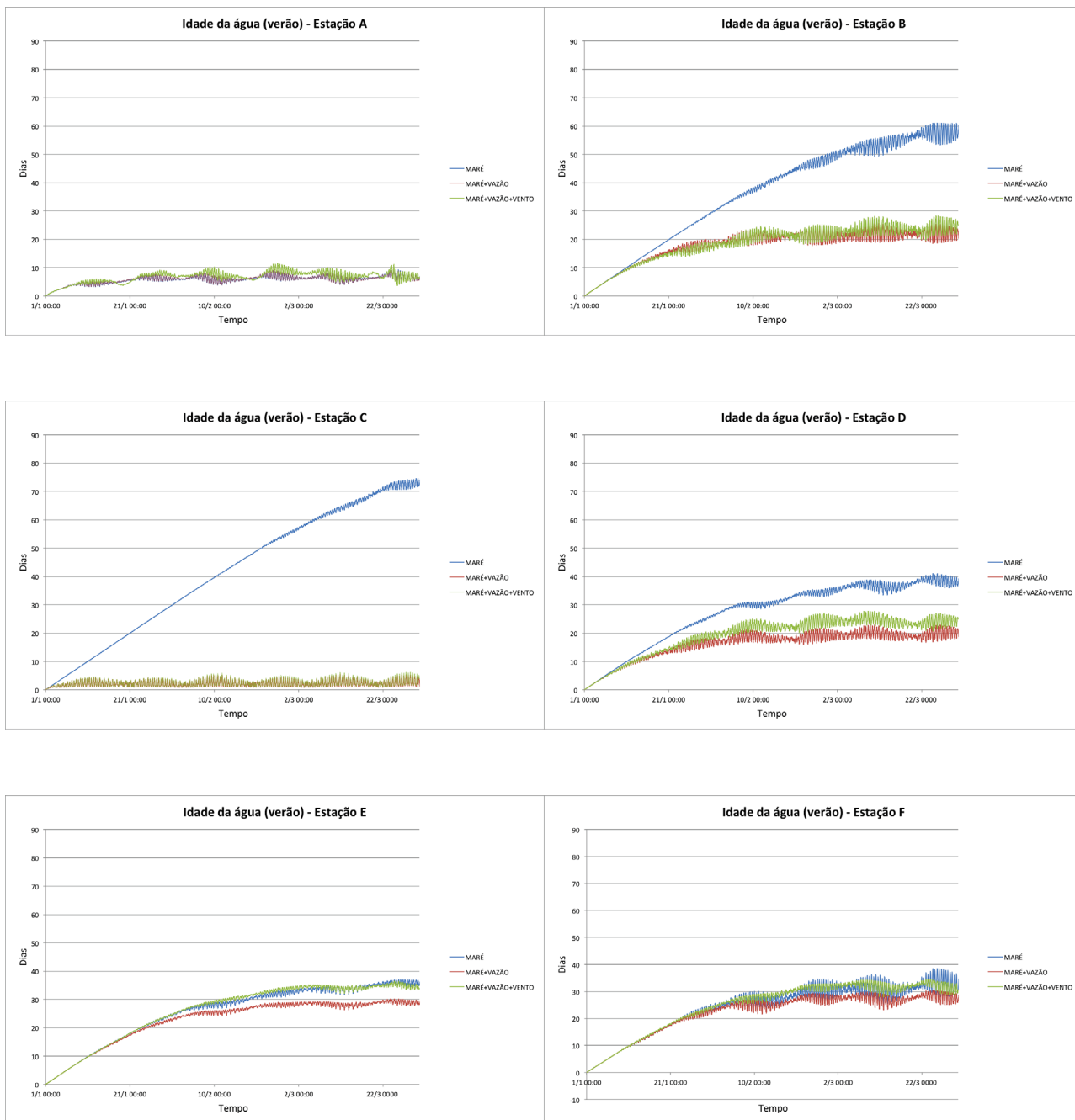


Figura 4.10: Evolução temporal da idade da água para os cenários 1-V (maré), 2-V (maré e vazão) e 3-V (maré, vazão e vento) nas estações A, B, C, D, E e F (localização das estações na Figura 3.1).

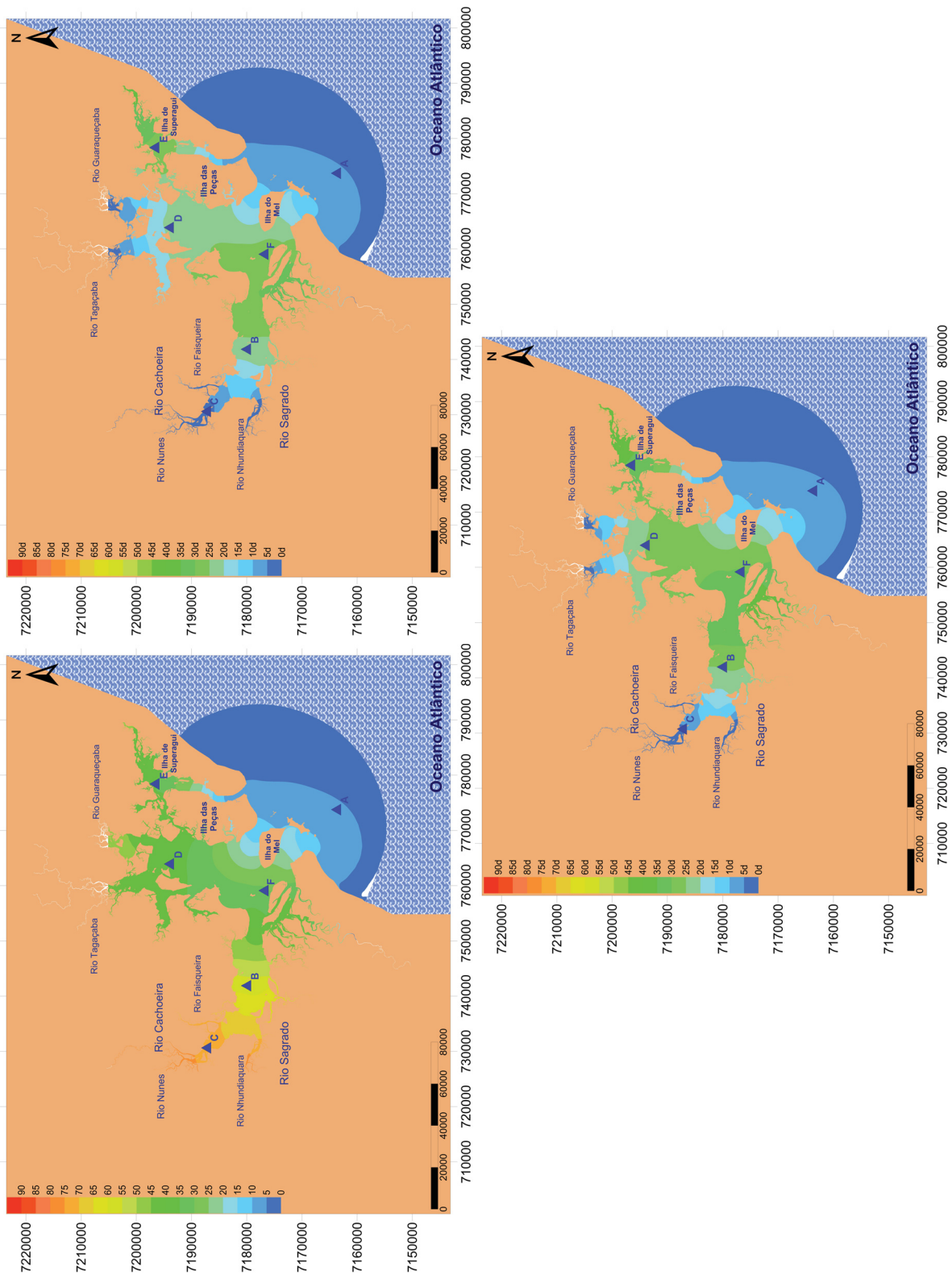


Figura 4.11: Idade da água para todo o domínio do CEP após 3 meses de simulação nos cenários 1-V (imagem em cima, à esquerda), 2-V (imagem em cima, à direita) e 3-V (imagem embaixo).

4.2.3 Escoamento residual: Cenário 2-V

Nesta seção são apresentados os campos de velocidade residual gerados apenas para o Cenário 2-V, dado que o propósito aqui é somente confirmar se as possíveis áreas de estagnação no CEP, que são as que apresentaram menores taxas de renovação e maiores valores de idade da água, possuem velocidades residuais baixas e apresentam a formação de vórtices.

Os campos de velocidades residuais foram calculados para um referencial euleriano, em maré de sizígia, com o período de aproximadamente $25 h$, e para um período de uma semana, também durante uma sizígia. Optou-se em calcular esse campo para dois períodos distintos a fim de analisar o efeito da maré (período de $25 h$) e o efeito de outros fatores (período de uma semana), como as vazões fluviais, sobre as correntes residuais.

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os campos de correntes residuais após $25 h$ e após uma semana, respectivamente. Já a Figura 4.14 apresenta em detalhe os vórtices formados por esses respectivos campos no interior do CEP. Analisando as Figuras 4.12 e 4.13, é possível perceber que as velocidades residuais calculadas após o período de $25 h$ são diferentes das calculadas após o período de uma semana, indicando que outros fatores além das marés, como as vazões fluviais e o vento, possuem efeito no escoamento residual.

As possíveis áreas de estagnação — regiões da baía dos Pinheiros e da baía de Paranaguá — possuem velocidades residuais menores do que nas demais áreas, o que corrobora com essa hipótese. Ademais, é possível visualizar através da Figura 4.14, a formação de vários vórtices entorno da região da ilha do Mel e da ilha das Peças.

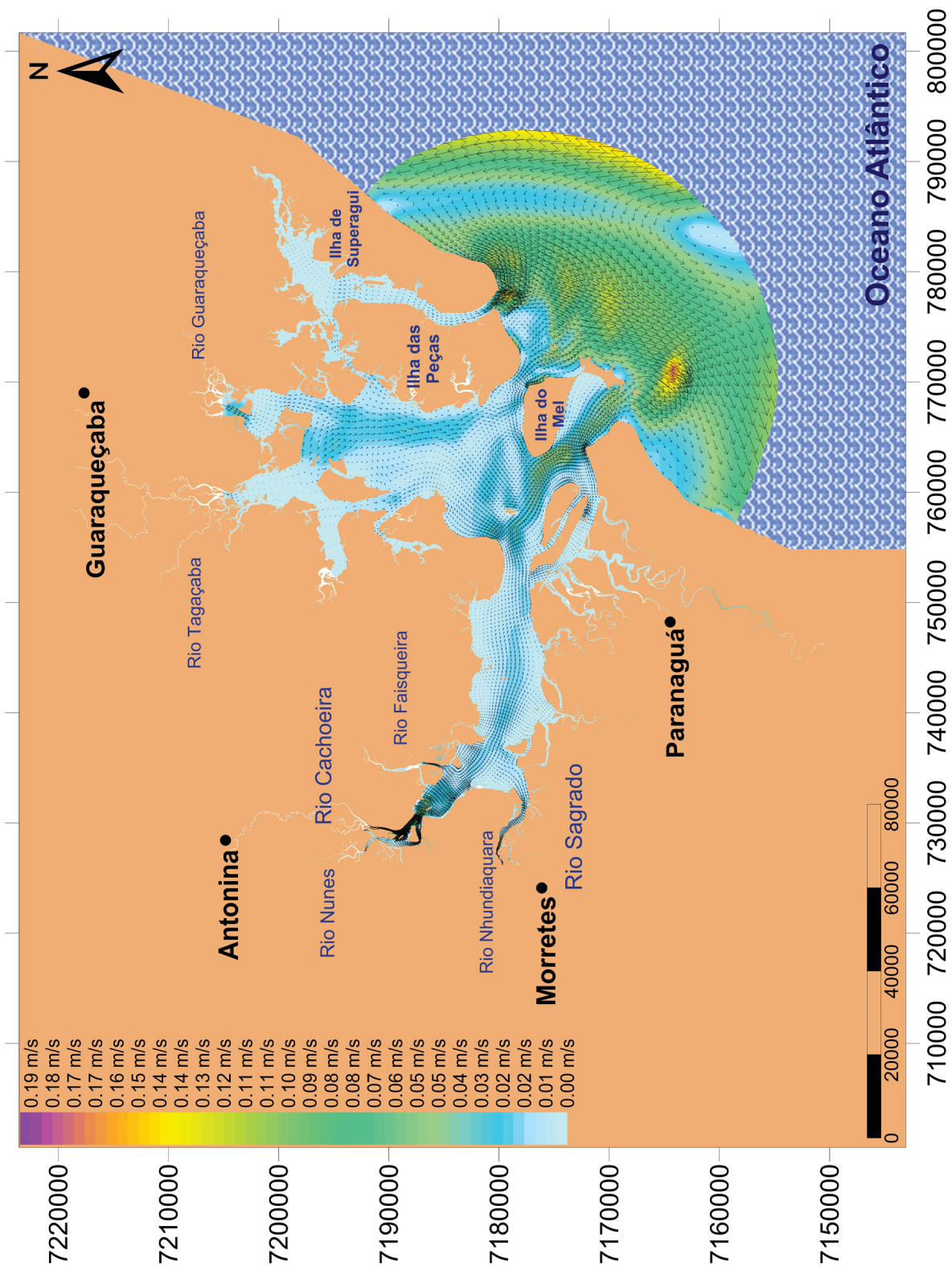


Figura 4.12: Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h para o Cenário 2-V (maré e vazão).

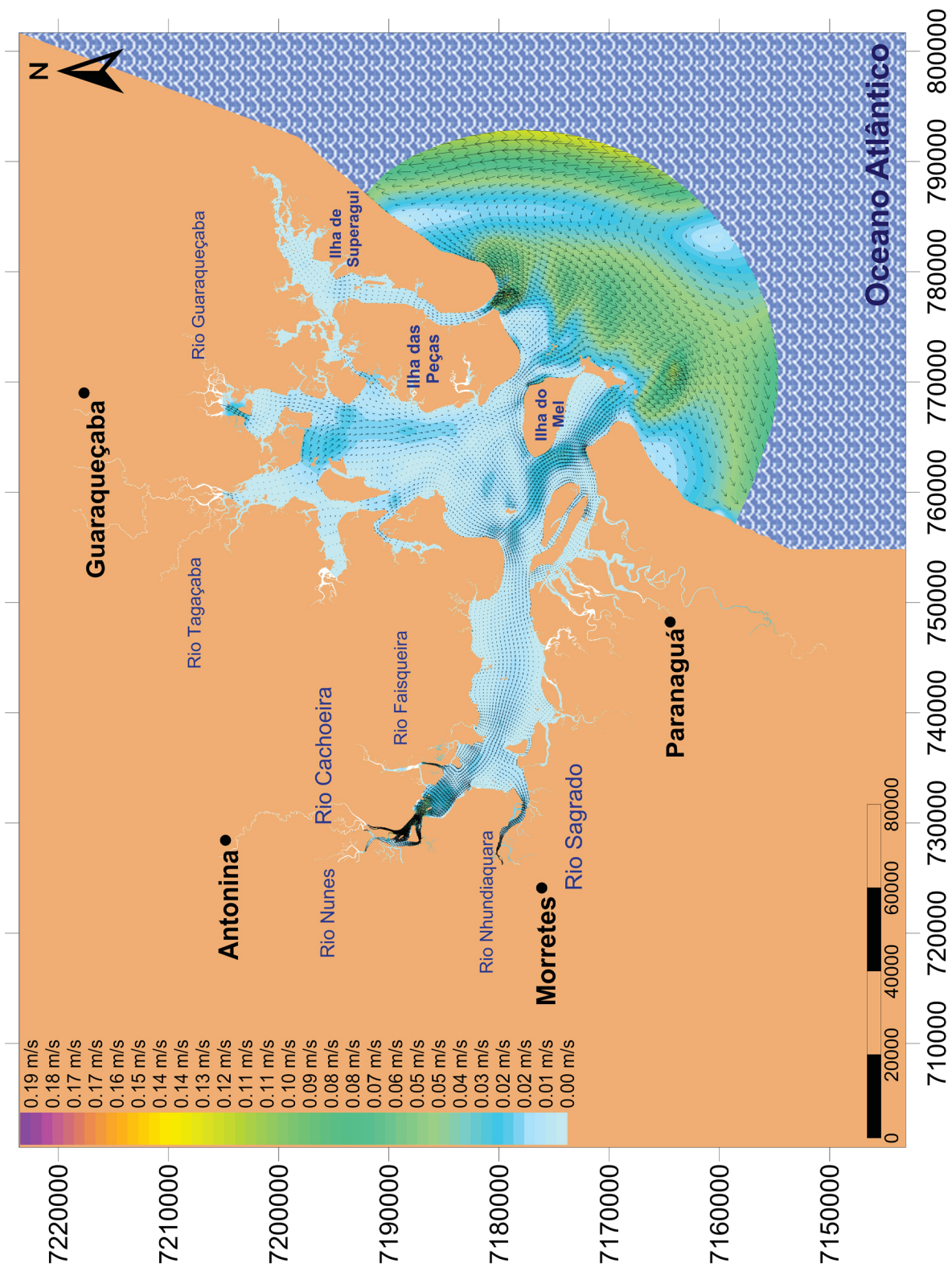


Figura 4.13: Campo de correntes residuais em sizígia ao longo de uma semana para o Cenário 2-V (maré e vazão).

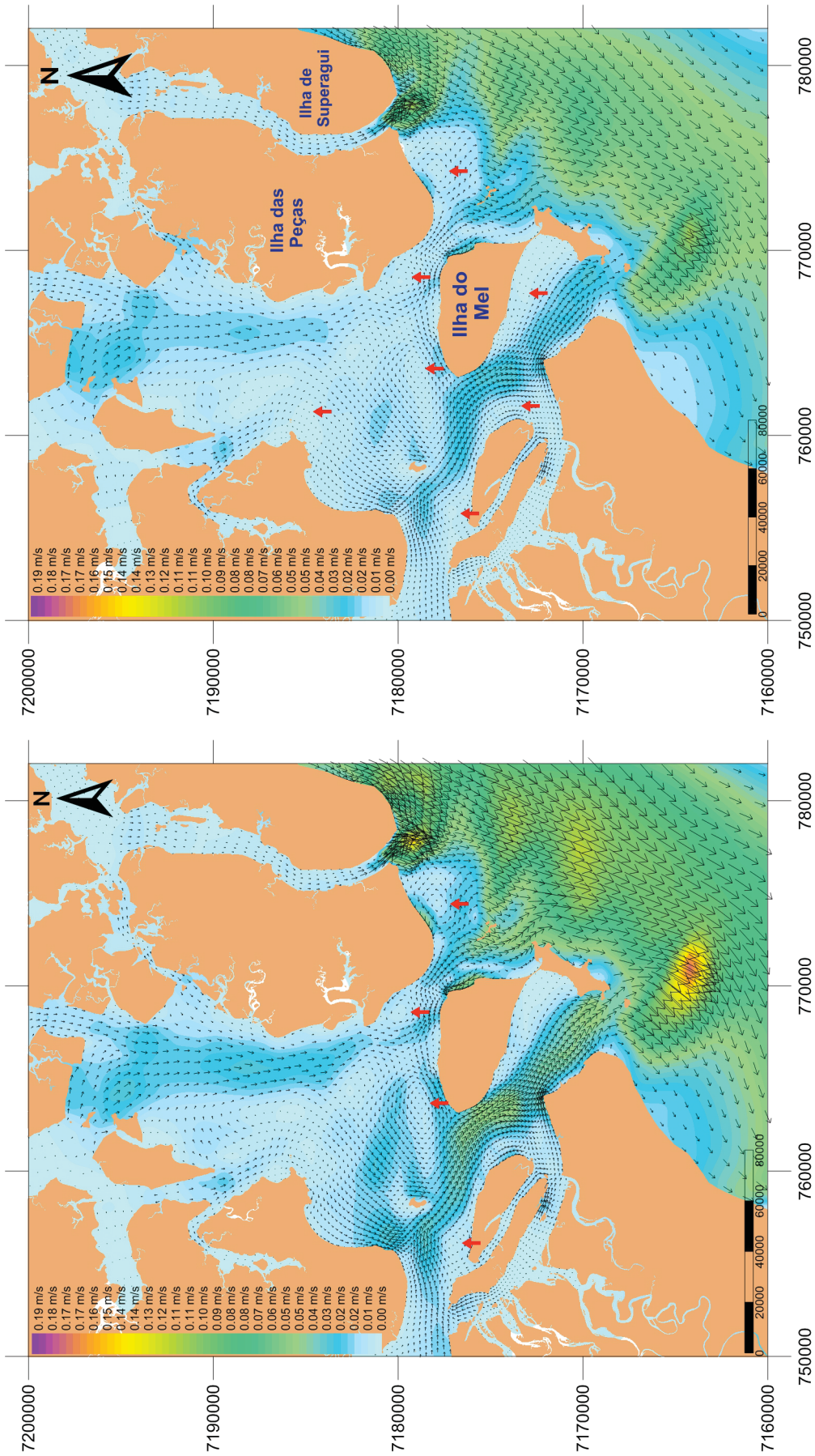
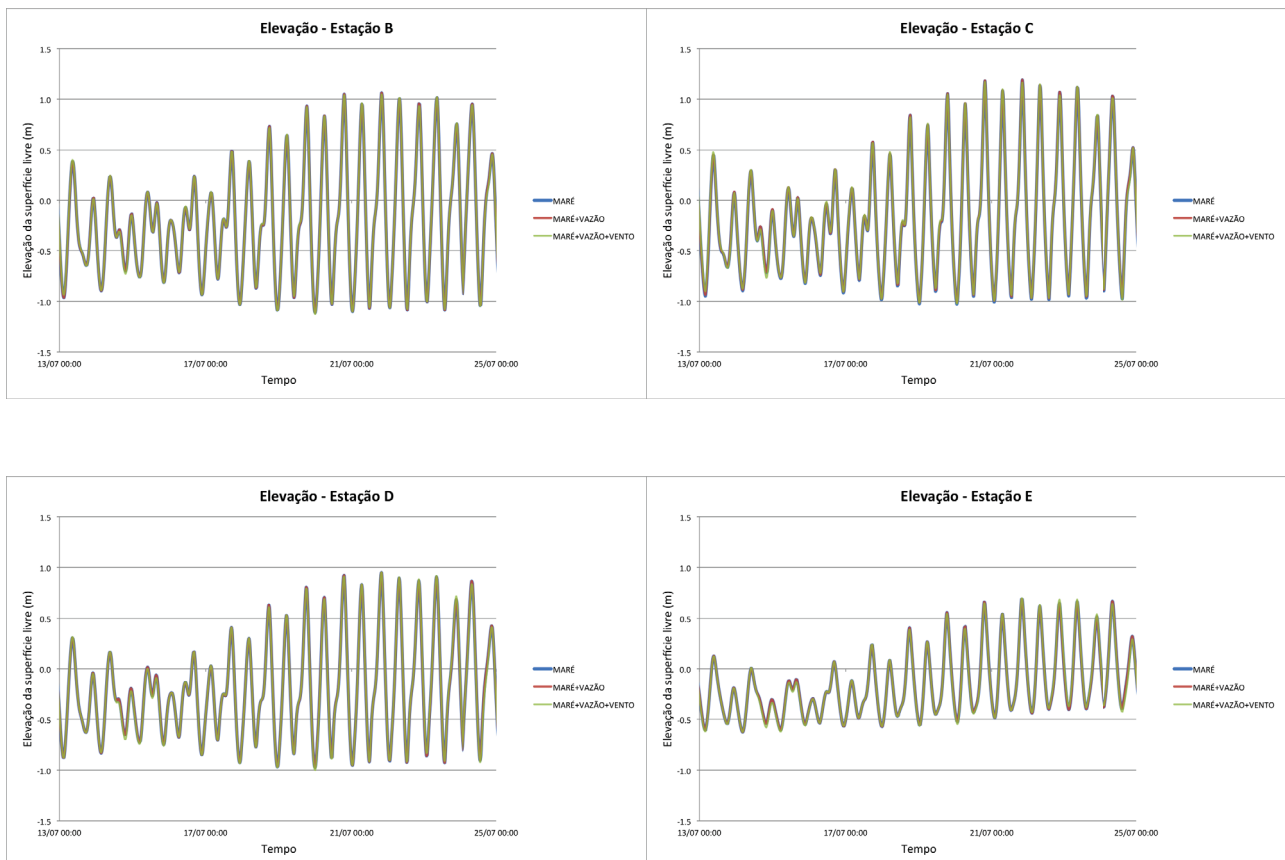


Figura 4.14: Vórtices formados pelo campo de correntes residuais em sizígia ao longo de 25 h (imagem à esquerda) e ao longo de uma semana (imagem à direita) para o Cenário 2-V (maré e vazão).

4.3 Cenários hidrodinâmicos: período representativo de inverno (1-I, 2-I e 3-I)

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte euleriano do SisBaHiA[®] através de simulações realizadas para os cenários representativos de inverno no período de 01/06/2009 a 31/08/2009. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam para as estações B, C, D, E e F, cujas localizações podem ser vistas na Figura 3.1, a elevação e as componentes E-W e N-S, respectivamente, para os três cenários representativos de inverno (Cenário 1-I, Cenário 2-I e Cenário 3-I). Em cada uma dessas figuras são mostrados os resultados obtidos para uma maré de quadratura e uma maré de sizígia. Analisando os resultados é possível perceber que não há significativas diferenças entre os cenários em cada uma das cinco estações, sendo as diferenças ainda menos perceptíveis do que nos cenários representativos de verão. Isso ocorre porque as vazões fluviais inseridas nos cenários representativos de inverno são significativamente menores daquelas inseridas no de verão, atenuando assim, as diferenças entre os cenários.



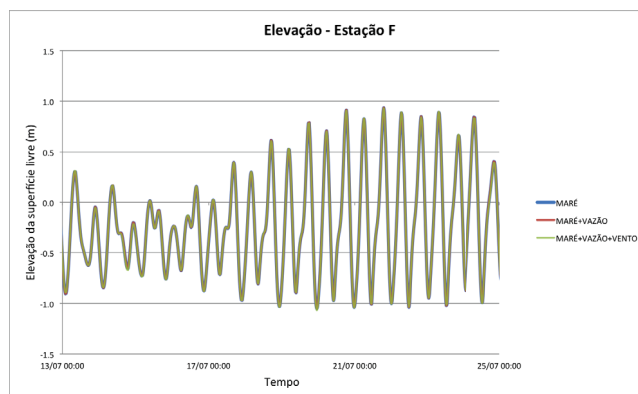
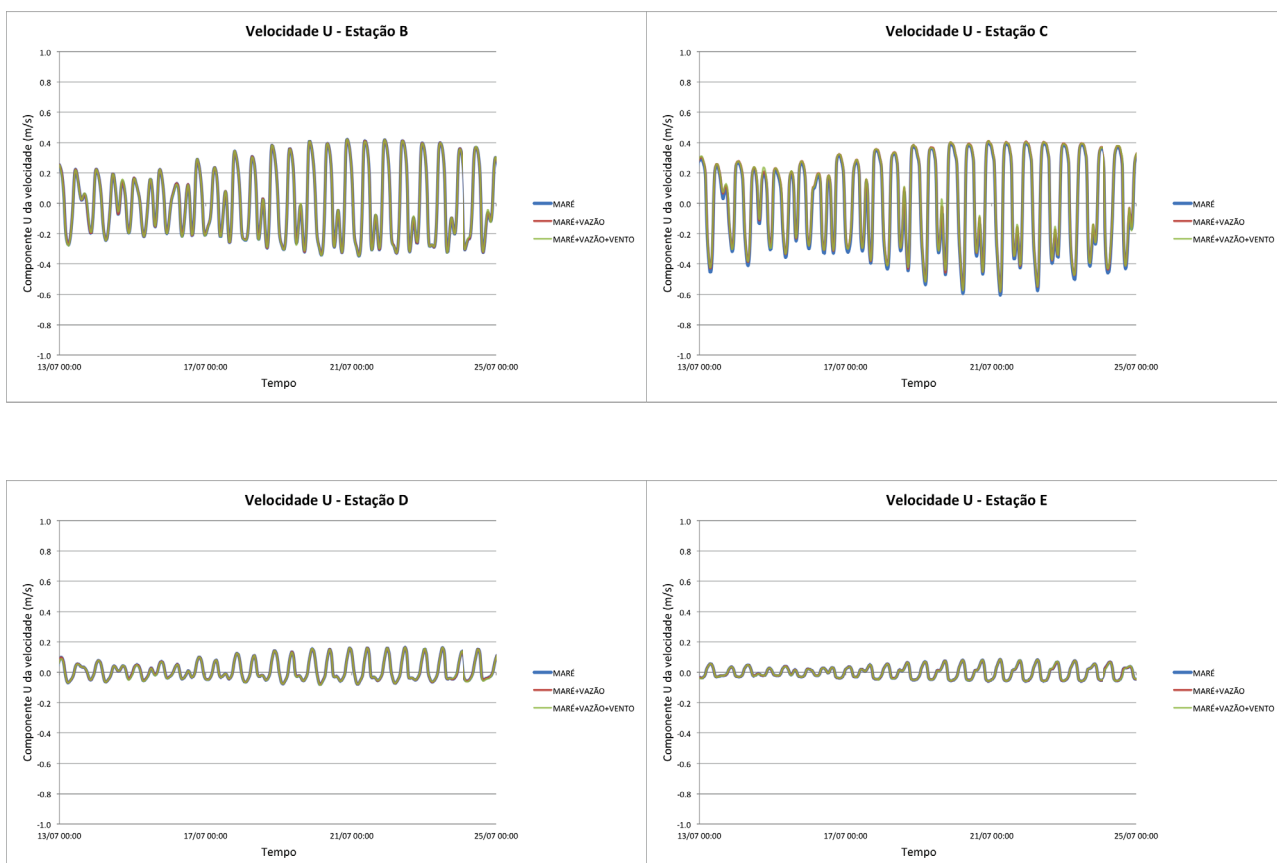


Figura 4.15: Valores de elevação obtidos com o SisBaHiA[®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I).



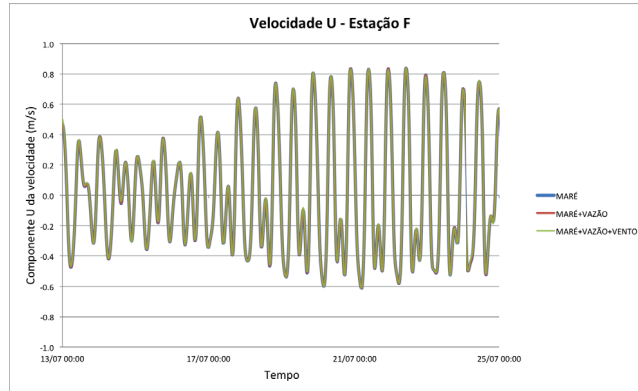
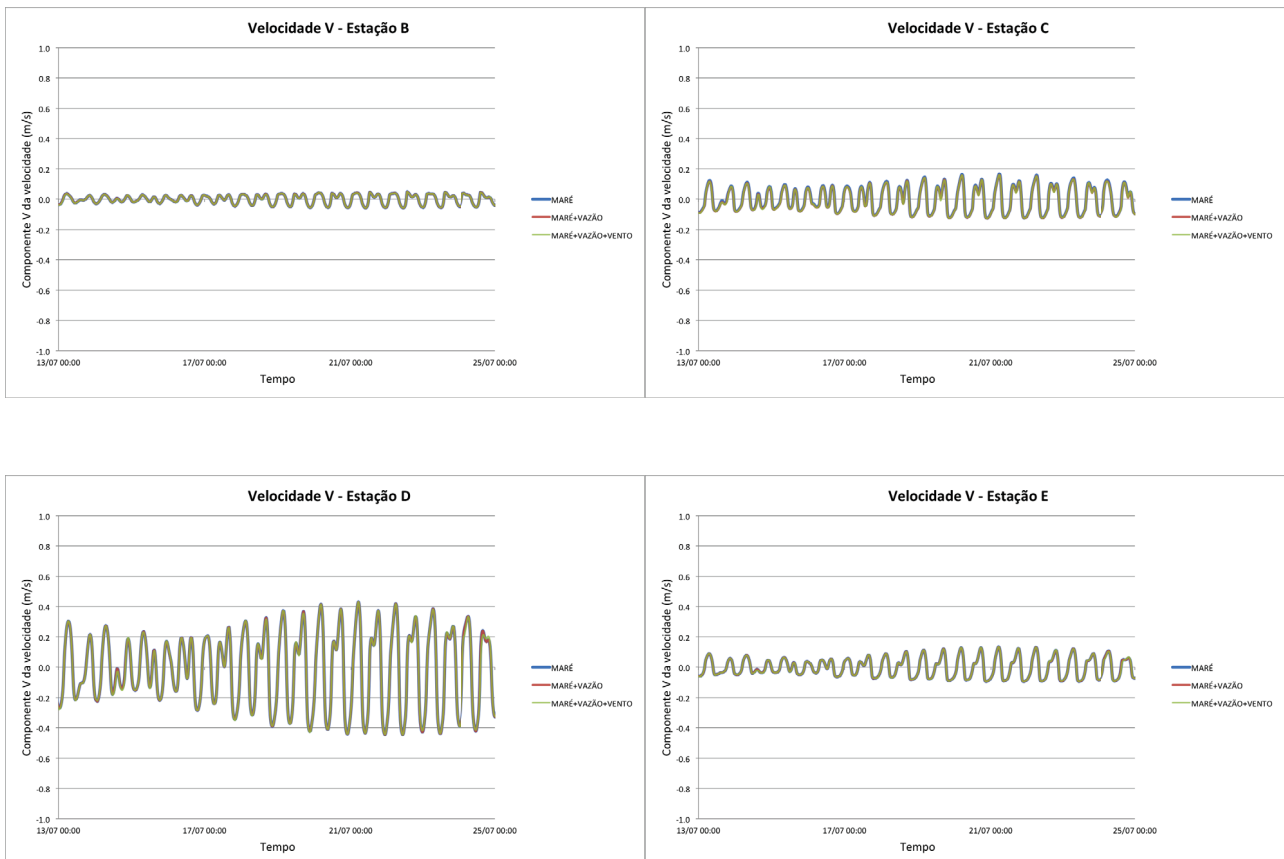


Figura 4.16: Valores da componente E-W da velocidade obtidos com o SisBaHiA[®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I).



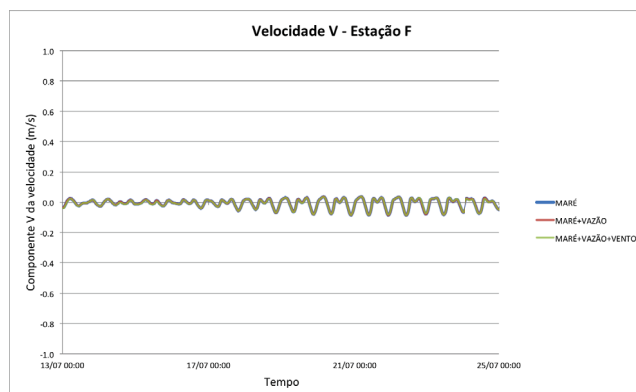


Figura 4.17: Valores da componente N-S da velocidade obtidos com o SisBaHiA[®] para os cenários de inverno (1-I, 2-I e 3-I).

4.3.1 Taxas de renovação

A Figura 4.18 apresenta a evolução temporal da taxa de renovação nas seis estações (A, B, C, D, E e F). Já a Figura 4.19 apresenta, para os Cenários 1-I, 2-I e 3I, as taxas de renovação para todo o domínio do CEP após três meses de simulação. Analisando a Figura 4.18, observa-se que dentre todas as estações, assim como nos cenários representativos de verão, as águas são renovadas mais lentamente no Cenário 1-I.

Apesar das diferenças entre os Cenários 1-I e 2-I serem menores do que as diferenças entre os Cenários 1-V e 2-V, o que acontece devido às vazões fluviais serem significativamente menores no inverno do que no verão, é possível afirmar que a vazão fluvial, assim como nos cenários representativos de verão, é a forçante mais importante no processo de renovação das águas. Também é possível observar que as diferenças entre os Cenários 2-I e 3-I são menores do que as diferenças entre os Cenários 2-V e 3-V, e isso ocorre porque o Cenário 3-I possui um regime de vento menos intenso do que o Cenário 3-V, o que atenua ainda mais a influência do vento na renovação das águas no CEP.

Analisando a Figura 4.19, observa-se que as possíveis áreas de estagnação são as mesmas do que nos cenários representativos de verão: região da baía dos Pinheiros (estação E) e a região da baía de Paranaguá (estação F), esta sendo mais extensa do que nos cenários representativos de verão.

