



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO-UFPE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS-CTG  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA-DOCEAN  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
OCEANOGRAFIA**

**Análise da influência do cisalhamento eólico  
sobre a circulação na região costeira de  
Guamaré-RN, Brasil**

**FABIANA SOARES LEITE**

**Recife/Brasil  
2007**

**FABIANA SOARES LEITE**

**Análise da influência do cisalhamento eólico  
sobre a circulação na região costeira de  
Guamaré-RN, Brasil**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Oceanografia da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre em Ciências,  
na área de Oceanografia Abiótica.

Orientador: Dr. Moacyr Araújo

Co-orientador: Dr. Raul Montagne

**Recife/Brasil  
2007**

**L533a Leite, Fabiana Soares**

Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guararé-RN, Brasil / Fabiana Soares Leite. - Recife: O Autor, 2007.

xvi, 167 f. : il. (algumas color.), gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Dpto. de Oceanografia. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2007.

Inclui referências bibliográficas e anexos.

1. Oceanografia. 2. Modelagem Matemática. 3. Cisalhamento Eólico - Guararé-RN. 4. Circulação Costeira – Brasil, Nordeste. I. Título.

**551.46 CDD (22. ed.)**

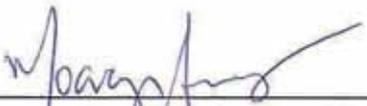
**BCTG/2007-89**

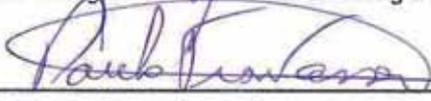
**FABIANA SOARES LEITE**

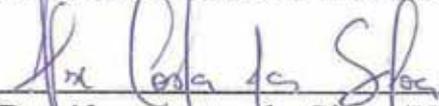
**Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guamaré-RN, Brasil**

Dissertação apresentada à seguinte banca examinadora em 18/05/2007.

Titulares:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho (Orientador/UFPE)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Paulo Eurico Pires Ferreira Travassos (UFRPE)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alex Costa da Silva (UECE)

Suplentes:

Dr<sup>a</sup>. Carmen Medeiros Limonji (UFPE)

Dr. José Oribe Rocha de Aragão (ITEP)

*Aos meus amados pais,  
Lula e Lio, por todo seu amor e  
dedicação a suas filhas.*

## **Agradecimentos**

Este estudo é fruto de uma jornada, a qual não teria sido concluída sem a participação de várias pessoas, seja no lado profissional, seja no lado emocional. Deixo aqui, portanto, meus sinceros agradecimentos:

Aos professores Moacyr Araújo e Mônica Costa por me darem a oportunidade de ter ingressado na oceanografia.

Ao meu orientador, Moacyr Araújo (Moa), por ter me recebido e acreditado na minha capacidade, por compartilhar comigo os seus conhecimentos e experiências, e pelo constante incentivo profissional. Estendendo meus sinceros agradecimentos ao meu co-orientador, Raul Montagne.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES) por me fornecer subsídios para minha formação de pesquisadora.

Ao professor Paulo Cesar Colonna Rosman, e sua equipe da COPPE/UFRJ, por ter me acolhido em seu laboratório durante três semanas para estagiar com o modelo SisBaHiA (por ele desenvolvido) e por ter compartilhado um pouco do seu imenso conhecimento na área de Engenharia Oceânica.

Ao apoio da Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS, que disponibilizou as informações de vento das estações meteorológicas da Bacia Potiguar.

Ao Geólogo Eugênio Frazão e à Dra. Helenice Vital, do Departamento de Geologia da UFRN, que disponibilizaram os dados batimétricos da região costeira da Bacia Potiguar.

Aos meus amigos da turma de especialização em Oceanografia, os quais muitos deles entraram juntos comigo nesta jornada do mestrado - Evaldeni, Jessér, Leandro, Sérgio, Thiago, Renata, Lílian, Gilson e Antônio - e muito me ensinaram sobre suas respectivas áreas. Estendendo também a minha gratidão aos demais amigos da pós-graduação do DOCEAN, em especial à Xiomara pela amizade e companhia nas longas noites de trabalho no departamento.

Aos meus amigos do LOFEC – Patrícia, Rodolfo, Ana Regina, Dóris, Mara, George e Isaac, em especial a Marcelo e Marcus que sempre estiveram dispostos a me ajudar e dividiram comigo seus conhecimentos adquiridos no departamento.

Aos professores do DOCEAN, os quais muito me ensinaram sobre suas respectivas áreas e compartilharam de suas experiências.

Aos funcionários, demais colegas e integrantes do DOCEAN – especialmente, Myrna Lins, dona Edileuza, seu “Mano”, seu “Beto”, e os seguranças, Carlos, Ronaldo, Jeferson e Conceição – meus sinceros agradecimentos pela boa convivência e atenção a mim prestadas.

Aos meus pais, Luiz Carlos e Eliane, os quais sempre estiveram presentes, me apoiando em todos os momentos da minha vida. Não posso deixar de explicitar que foi minha mãe a principal incentivadora e responsável por eu ter buscado esta encantadora área que é a oceanografia.

À Melcei, meu querido companheiro, por todo apoio e pela compreensão diante do meu cansaço durante o período do mestrado.

À toda minha família (especialmente Nim, minha avó Zenaide e minhas tias, Edilene, Sandra e Célia) e amigos (especialmente Johanna) pelo apoio constante diante de tantas dificuldades e obstáculos durante esta etapa.

Enfim, minha eterna gratidão a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente desta etapa da minha vida! Obrigada!

## Resumo

O sistema de modelos SisBaHiA foi utilizado para analisar a influência do cisalhamento eólico sobre a circulação da região costeira de Guamaré, estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Para isso, foram obtidas as correntes residuais sazonais desta área, onde as componentes vetoriais médias da situação forçada exclusivamente pelas marés foram subtraídas dos resultados da situação “real” (marés + vento). A análise intrasazonal evidenciou uma maior dinâmica da maré de sizígia sobre a maré de quadratura, a qual apresentou maiores correntes residuais durante todo o ciclo de maré tanto no período chuvoso quanto no seco. A direção predominante em ambos os períodos e marés foi para noroeste (NO – superfície) e para oeste (O – outros dois níveis abaixo). Para tanto, há exceção para as correntes superficiais da maré de sizígia que se direcionaram para oeste (baixa-mar – chuvoso; vazante – seco) e para sudoeste (enchente – chuvoso; baixa-mar e enchente – seco). A análise sazonal apresentou correntes residuais mais intensas durante todo o ciclo de maré do período seco em ambas as marés, devido aos ventos serem mais fortes nesta época. Estas correntes tiveram direção predominante para oeste (O), no meio e próximo ao fundo da coluna d’água. No entanto, os vetores das correntes superficiais se dirigiram para noroeste (NO), durante o período chuvoso, exceto na enchente da sizígia que se dirigiu para oeste-sudoeste (O-SO). Durante o período seco, as correntes superficiais se direcionaram com predominância para noroeste (NO), durante a quadratura, e para oeste (preamar e vazante) e oeste-sudoeste (baixa-mar e enchente), durante a sizígia. Tais resultados sugerem grande influência dos ventos na quadratura, principalmente durante o período seco. O papel da forçante eólica sobre a dispersão de efluentes foi simulado em dois locais distintos (emissários na Plataforma Continental interna e vazamento de óleo no estuário) a partir da baixa-mar da sizígia. Os efluentes lançados pelos emissários passaram 12 horas para atingir os limites do domínio modelado durante o período seco (ventos mais intensos). A pluma, transportada para oeste (O), chegou a 2,9 km da costa. Sem a ação dos ventos as partículas alcançaram a fronteira aberta a partir do 11º dia de simulação. O vazamento de óleo no Porto ficou contido completamente dentro do estuário durante o período seco. O óleo saiu do estuário nas outras duas simulações, tendo se distanciado mais da fonte (na direção noroeste) durante o período chuvoso. Este comportamento revela a importância dos ventos alíseos de nordeste (NE) na contenção do óleo dentro do estuário, do contrário o óleo chegaria a atingir a Plataforma Continental interna.

**Palavras-Chave:** modelagem matemática, cisalhamento eólico, circulação costeira, SisBaHiA, Guamaré - RN, Brasil.

## Abstract

The SisBaHiA model system was used to analyze the wind stress influence over the circulation of Guamaré's coastal region, Rio Grande do Norte state, Brazil. Seasonal residual currents were calculated for this area. Mean vectorial components from the only-tidal situation were subtracted from the « real » situation results (tide + wind). The intraseasonal analysis confirmed a better dynamics of the spring tide over the neap tide. The latter presented the highest residual currents during the tidal cycle in both seasons (fall and summer). The predominant direction was northwestward (NW - surface) and westward (W - intermediate and close to the bottom levels) for both seasons and tides. The residual currents indicated a surface flow to the west (low tide - rainy period; ebb tide - dry one) and to the southwest (flood - rainy period; low and flood tides - dry one) during the spring tide. The seasonal analysis presented more intense residual currents during the tidal cycle in the dry period than the rainy one due to the strongest winds in this time. These currents showed a predominant westward direction in the intermediate and close to the bottom levels (both periods). In the surface, these directions were northwestward (rainy and neap dry periods) and westward (southwestward) during high/ebb tides (low/flood tides) of the spring dry period. Such results suggested a significant wind influence over the neap tide, mainly during the dry period. The action of wind forcing over effluents dispersion was simulated in two distinct places (ducts in the internal Continental Shelf and oil spilling in the estuary) starting at the spring low tide. The effluents released by the ducts spent 12 hours to reach the open boundary of the studied area in the dry season. The effluents plume, with westward direction, was 2.9 km away from the coast. Without the wind action, the particles reached the open boundary in 11 days of simulation. The oil spilling was restricted to the estuary during the dry period. However, during the other two simulations, the oil was transported to the Continental Shelf, being farther from the spilling source during the rainy season (northwest direction). This behavior reveals the importance of NE prevailing winds in keeping the oil inside the estuary.

**Keywords:** mathematical modeling, wind shear, coastal circulation, SisBaHiA, Guamare - RN, Brazil.

## **Lista de Figuras**

### **Capítulo 3**

Figura 3.1. Mapa de localização da Região Costeira de Guamaré - RN com as duas tubulações dos emissários submarinos (E1 e E2, à esquerda) e o Porto de Guamaré (P, no detalhe).

Figura 3.2. Tipos climáticos no estado do Rio Grande do Norte. Fonte: IDEMA (2002).

Figura 3.3. Climatologia da precipitação em Guamaré – RN. Fonte: EMPARN (2007), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, <http://www.inmet.gov.br> (dados de 1962 a 2005).

Figura 3.4. Climatologia da precipitação e temperatura do ar em Guamaré – RN. Fonte: EMPARN (2007), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, <http://www.inmet.gov.br> (dados de 2001 a 2004).

Figura 3.5. Climatologia do vento (anemômetro V1) em Macau – RN. Fonte: PETROBRAS (2006b) (dados de 2001 a 2006).

Figura 3.6. Climatologia do vento (anemômetro V2) em Macau – RN. Fonte: PETROBRAS (2006b) (dados de 2001 a 2006).

### **Capítulo 4**

Figura 4.1. Sistema de coordenadas da modelagem 3D e 2DH, onde NR é o nível de referência. Fonte: Rosman (2001).

Figura 4.2. Malha de discretização do domínio modelado da RCG.

Figura 4.3. Batimetria da RCG.

Figura 4.4. Diagrama polar dos dados de vento médio usados para a simulação do período chuvoso.

Figura 4.5. Gráfico de barras para as direções dos ventos médios típicos do período chuvoso (maio a julho) usados para a simulação.

Figura 4.6. Diagrama polar dos dados de vento médio (novembro a janeiro) usados para a simulação do período seco.

Figura 4.7. Gráfico de barras para as direções dos ventos médios típicos do período seco (novembro a janeiro) usados para a simulação.

Figura 4.8. Curva de maré obtida através das constantes harmônicas do Porto de Guamaré, exibindo as marés de sizígia (S - quadrado azul) e quadratura (Q - quadrado rosa) utilizadas para análise durante toda a simulação (62 dias).

Figura 4.9. Curva de maré dos 20 dias de simulação do modelo Lagrangeano (Emissários e Vazamento de óleo).

## **Capítulo 5**

Figura 5.1. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.2. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.3. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.4. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.5. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.6. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.7. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.8. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.9. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.10. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.11. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.12. Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.13. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.14. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d'água da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.15. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.16. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.17. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d'água da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.18. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.19. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.20. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d'água da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.21. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.22. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.23. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d'água da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.24. Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

Figura 5.25. Valores residuais da velocidade das correntes superficiais da preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.26. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.27. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.28. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.29. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.30. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.31. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.32. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.33. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.34. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.35. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.36. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.37. Valores residuais da velocidade das correntes superficiais da preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.38. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.39. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.40. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.41. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.42. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.43. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.44. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.45. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.46. Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da enchente de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.47. Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da enchente de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.48. Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a enchente de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Figura 5.49. Pluma dos emissários considerando apenas o efeito da maré. (a) 1 h, (b) 6 hs, (c) 24 hs e (d) 11 dias após o início do lançamento das partículas.

Figura 5.50. Pluma dos emissários durante o período chuvoso. (a) 1 h, (b) 6 hs, (c) 24 hs e (d) 36 hs após o início do lançamento das partículas.

Figura 5.51. Pluma dos emissários durante o período seco. (a) 1 h, (b) 5 hs, (c) 10 hs e (d) 12 hs após o início do lançamento das partículas.

Figura 5.52. Pluma do vazamento de óleo de 1 m<sup>3</sup> durante 1 hora considerando apenas o efeito da maré. (a) 1 h, (b) 3 hs, (c) 6 hs e (d) 36 hs após o início do vazamento de óleo na baixa-mar.

Figura 5.53. Pluma do vazamento de óleo de 1 m<sup>3</sup> durante 1 hora durante o período chuvoso. (a) 1 h, (b) 3 hs, (c) 6 hs e (d) 36 hs após o início do vazamento de óleo na baixa-mar.

Figura 5.54. Pluma do vazamento de óleo de 1 m<sup>3</sup> durante 1 hora durante o período seco. (a) 1 h, (b) 3 hs, (c) 6 hs e (d) 36 hs após o início do vazamento de óleo na baixa-mar.

## Capítulo 6

Figura 6.1. Esquema da influência eólica sobre a circulação da RCG durante o período seco (mediana da intensidade dos ventos é  $6,67 \text{ m.s}^{-1}$ ). Legenda: sizígia ( $\rightarrow$ ) quadratura ( $\dashrightarrow$ ); ventos predominantes (**verde**); ventos mais intensos (**azul**).

Figura 6.2. Esquema da influência eólica sobre a circulação da RCG durante o período chuvoso (mediana da intensidade dos ventos é  $4,79 \text{ m.s}^{-1}$ ). Legenda: sizígia ( $\rightarrow$ ) quadratura ( $\dashrightarrow$ ); ventos predominantes (**verde**); ventos mais intensos (**azul**).

## **Lista de Tabelas**

### **Capítulo 4**

Tabela 4.1. Características das oscilações do nível do mar utilizadas como condição de contorno para as simulações na RCG - RN. Fonte: FEMAR (2005).

Tabela 4.2. Opções de modelagem consideradas nas simulações da RCG.

Tabela 4.3. Tratamento das condições de contorno consideradas nas simulações da RCG.

## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIV</b>
CAPITULO 1.....	1
INTRODUÇÃO .....	1
CAPITULO 2.....	4
OBJETIVOS .....	4
CAPITULO 3.....	6
ÁREA DE ESTUDO.....	6
3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO.....	6
3.2. ESTUDOS OCEANOGRÁFICOS NA RCG.....	10
3.3. FORÇANTES METEOROLÓGICAS .....	15
3.3.1. Aspectos de macro e meso escalas.....	15
3.3.2. Aspectos locais.....	19
CAPITULO 4.....	24
ABORDAGEM METODOLOGICA .....	24
4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS COSTEIROS.....	24
4.2. O MODELO SISBAHIA .....	26
4.3. O MÓDULO HIDRODINÂMICO EULERIANO.....	27
4.3.1. Equações básicas .....	29
(a) Módulo 3D .....	30
(b) Módulo 2DH .....	34
4.4. O MÓDULO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO.....	36
4.5. APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO .....	38
4.5.1. Malhas de discretização espaço-temporal.....	38
4.5.2. Batimetria .....	40
4.5.3. Cisalhamento eólico .....	42
4.5.4. Forçante astronômica (marés).....	46
4.5.5. Condições iniciais .....	47
4.5.6. Condições de contorno horizontais .....	48
4.5.7. Cenários de simulação.....	50
4.6. APLICAÇÃO DO MODELO LAGRANGEANO.....	51
4.6.1. Emissários .....	53

4.6.2. Vazamento de óleo.....	53
CAPITULO 5.....	55
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
5.1. MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO .....	56
5.1.1. Variabilidade intrasazonal - ciclos e estágios de maré.....	56
(a) Período chuvoso (campos residuais) - sizígia x quadratura .....	56
(b) Período seco (campos residuais) - sizígia x quadratura .....	73
(c) Análise dos resultados intrasazonais .....	89
5.1.2. Variabilidade intersazonal - período chuvoso e período seco .....	92
(a) Sizígia .....	92
(b) Quadratura.....	109
(c) Análise dos resultados intersazonais .....	125
5.2. MODELO LAGRANGEANO .....	127
5.2.1. Emissários .....	127
(a) Maré .....	127
(b) Maré e ação eólica - período chuvoso .....	129
(c) Maré e ação eólica - período seco.....	132
5.2.2. Vazamento de óleo.....	134
(a) Maré .....	134
(b) Maré e ação eólica - período chuvoso .....	136
(c) Maré e ação eólica - período seco.....	138
CAPITULO 6.....	141
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	141
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	145
ANEXO A - CAMPO CINEMATICO SUPERFICIAL (MARE E AÇÃO EOLICA) NA BACIA POTIGUAR - SIZIGIA .....	156
ANEXO B - CAMPO CINEMATICO SUPERFICIAL (MARE E AÇÃO EOLICA) NA BACIA POTIGUAR - QUADRATURA.....	162

# Capítulo 1

## Introdução

A zona costeira representa 8% da superfície terrestre e apresenta elevada produtividade e biodiversidade, sendo responsável por cerca de 20% da produção pesqueira dos oceanos. Além disso, 60% da humanidade vive a pelo menos 100 km do mar (Vitousek *et al.*, 1997).

Os mecanismos físicos atuantes nestas regiões são fundamentais na estruturação dos ambientes costeiros, e se encontram diretamente influenciados por fatores meteorológicos (ex.: ventos, precipitação, pressão), oceanográficos (ex.: ondas, marés) e geológicos (distribuição e características dos sedimentos). Em consequência, o conhecimento da hidrodinâmica de um corpo d'água costeiro é fator importante para o gerenciamento da qualidade de suas águas, muitas vezes condicionada à distribuição e ao transporte de materiais no sistema, tais como, sedimentos, nutrientes, plâncton e matéria orgânica (Leussen & Dronkers, 1988; Mantovanelli, 1999). O movimento das águas, por exemplo, é o maior agente transportador de poluentes.

Parâmetros atmosféricos afetam o movimento das águas costeiras. Segundo Guimarães & Marone (1996), a superfície do mar reage como um barômetro invertido às variações de pressão atmosférica. Uma baixa

atmosférica, portanto, é acompanhada de nível do mar alto. Assim, fenômenos meteorológicos podem ser responsáveis pelo aumento ou diminuição do nível do mar em um dado local, bem como influenciar outros processos oceanográficos, tais como ressurgências, ressacas e ondas de tempestade.

A intensidade e direção dos ventos na atmosfera são resultados da distribuição irregular do aquecimento solar e de massas continentais, bem como da dinâmica de rotação do planeta. Localmente, a Região Nordeste do Brasil (referenciada a seguir por RNB) está sob influência da variabilidade sazonal dos ventos alíseos. Silva *et al.* (2002) constataram que a direção predominante do vento na região é de leste, com flutuações para sudeste e nordeste, tendo o Rio Grande do Norte apresentado o maior potencial eólico da RNB.

Ao cisalhar a superfície do mar, os ventos transferem quantidade de movimento da atmosfera para o meio líquido. Grande parte desta quantidade de movimento é utilizada na geração de ondas de gravidade superficiais, que ao se quebrarem e/ou interagirem com o campo de correntes local geram turbulência e mistura vertical de constituintes bióticos e abióticos (Gargett, 1989; Araujo *et al.*, 2001). A porção restante de quantidade de movimento cedida pela atmosfera produz cisalhamento vertical das correntes marítimas, por efeito viscoso, gerando assim mais turbulência para o sistema. A ação dos ventos na superfície do mar aparece, portanto, como um fator potencialmente importante na estruturação do transporte de massa e de energia no ambiente marinho, principalmente em regiões de alto potencial eólico, como no caso da porção setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN).

A ação contínua dos ventos alíseos de sudeste orienta as ondas e gera o mecanismo da deriva litorânea que é responsável pelo transporte de sedimentos de L para O nesta área (Silveira *et al.*, 2003). As regiões estuarinas e áreas adjacentes vêm sofrendo alterações de paisagem, ocasionadas algumas vezes por processos erosivos de origem natural

(processos de transporte litorâneo e eólico), mas também por fatores antrópicos, decorrentes de interesses econômicos e políticos. Como exemplo tem-se a forte tendência para a expansão da carcinicultura no estado, que tem ocupado as áreas anteriormente utilizadas para extração de sal, como é o caso da região de Guamaré (Souza *et al.*, 2005).

Um outro fator antrópico importante na região é a presença de atividades de produção e refino petróleo. É neste estado que a indústria petrolífera se encontra como atividade de destaque econômico. O RN é hoje o maior produtor nacional de petróleo em terra e o segundo no mar, atrás apenas do estado do Rio de Janeiro. Também é o terceiro na exploração de gás natural, com 9% da produção brasileira (Portal Brasil, 2005). Estas atividades podem causar impactos à zona costeira, comprometendo não só a integridade da paisagem natural, como também as atividades econômicas e o sustento das comunidades humanas locais (Castro *et al.*, 2005).

Diante do exposto, parece-nos claro que a caracterização do padrão hidrodinâmico desse sistema costeiro, considerando suas forçantes mais importantes, o regime de marés e o efeito do vento (com sua variação sazonal), figura como uma etapa necessária para uma maior compreensão dos mecanismos hidrodinâmicos dominantes na região.

## Capítulo 2

### Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência do cisalhamento eólico sobre a circulação da região costeira de Guamaré - RN, Brasil, utilizando uma técnica de modelagem matemática e simulação numérica.

Mais especificamente, foram também estabelecidos os seguintes objetivos:

- Analisar estatisticamente as forçantes eólicas da região com base em dados experimentais, definindo períodos típicos associados às situações extremas de ação dos ventos;

- Evidenciar, através dos resultados numéricos, a maior ou menor preponderância da ação eólica sobre a circulação costeira, para diferentes cenários de forçante astronômica (marés de sizígia/ quadratura) e estágios de maré (Baixa-mar/Enchente/Preamar/ Vazante), todos típicos da costa setentrional potiguar;

- Evidenciar, através dos resultados numéricos, o papel da forçante eólica sobre a dispersão de poluentes em dois locais distintos da Bacia Potiguar, que possuem dinâmica oceanográfica diferenciada, quais sejam:

(a) estuário do rio Aratuá (sistema Guamaré-Galinhos); e (b) Plataforma Continental interna adjacente à praia do Minhoto.

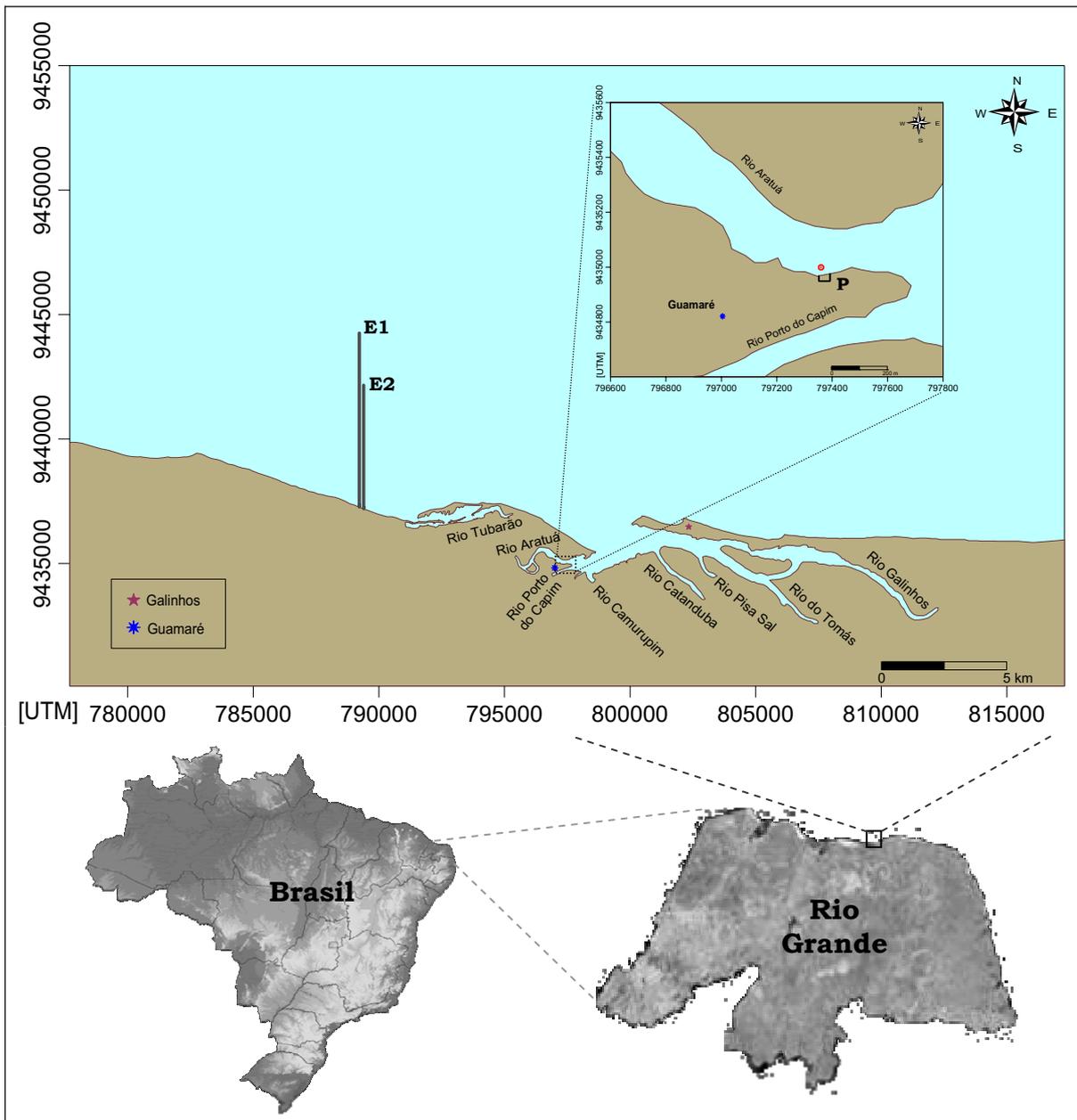
## Capítulo 3

### Área de Estudo

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO

A área de estudo compreende a Região Costeira de Guamaré (referenciada a seguir por RCG) (Figura 3.1), a qual está localizada no nordeste brasileiro, na porção setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN). A parte setentrional do RN estende-se por 244 km de linha de costa, onde 194 km são compostos por praias arenosas (Vital *et al.*, 2006), e possui uma área de aproximadamente 3.807 km<sup>2</sup> ou cerca de 7% da superfície do estado (IDEMA, 2005).

Esta área encontra-se inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar, a qual, segundo Milani *et al.* (2000), ocupa uma área de 27.000 km<sup>2</sup> na porção *offshore* e 22.000 km<sup>2</sup> em terra. A mesma constitui o segmento de ligação entre as bacias brasileiras da margem equatorial (bacias do Pará-Maranhão, de Barreirinhas, do Ceará e Potiguar) e da margem leste (Bacias de Pernambuco-Paraíba, de Sergipe-Alagoas, de Almada/Camamu/ Jacuípe, de Cumuruxatiba/Jequitinhonha, do Espírito Santo-Mucuri, de Campos, de Santos e de Pelotas).



**Figura 3.1.** Mapa de localização da Região Costeira de Guararé - RN com as duas tubulações dos emissários submarinos (E1 e E2, à esquerda) e o Porto de Guararé (P, no detalhe).

A erosão costeira nesta parte do litoral do RN é bastante comum e, segundo Vital *et al.* (2006), alguns dos motivos estão relacionados à dinâmica da circulação costeira, ao baixo suprimento de sedimentos e à fatores tectônicos. A morfologia do fundo da plataforma, condicionada pela configuração tectônica, contribui para erosão no litoral norte por

armazenar sedimentos em lugares específicos e por causa da refração das ondas devido à batimetria do mar aberto. Nestes aspectos, a região de Guamaré é considerada uma área de erosão, enquanto os pontais arenosos de Galinhos e Ponta do Tubarão são áreas de deposição. De acordo com Vital *et al.* (2004), há uma acelerada erosão na região de Guamaré, onde foi constatada 1.200 m de área erodida entre os anos de 1872 a 2001.

A Plataforma Continental não tem um gradiente elevado e sua geomorfologia é regida pela circulação das águas, como as correntes de maré, e pela influência da Corrente Norte do Brasil (CNB). Esta apresenta transição de um sistema de predominância siliciclástica, na Plataforma Continental interna, para um de predominância carbonática, na Plataforma Continental externa (Santos, 1998). A Plataforma Continental interna estende-se por cerca de 20-25 km até uma quebra topográfica em torno de 20 m de profundidade, marcada pelos recifes e bancos submersos alinhados (PETROBRAS, 2006a).

Em relação aos sedimentos que recobrem a plataforma, o substrato da região é predominantemente composto de areia e cascalho a profundidades de 20 m, contendo menos de 2,5 % de argila (Summerhayes *et al.*, 1977 *apud* Santos, 1998). A concentração de material em suspensão, segundo Barreto & Summerhayes (1977 *apud* Santos, 1998), é geralmente muito baixa (inferior a 0,5 mg.l<sup>-1</sup>).

Esta região possui um relevo dominante de planícies movimentado por cordões litorâneos de dunas, com altitudes inferiores a 100 m no geral, atingindo em alguns pontos 200 m, cortado por bacias flúvio-estuarinas, dentre as principais se encontra a de Guamaré-Galinhos (IDEMA, 2005).

Estruturas do tipo *grabens* (blocos rebaixados, geralmente, com comprimento maior do que a largura, e delimitados por sistemas de falhas convergentes para o interior) e *horsts* (blocos também de forma linear,

delimitados por falhas divergentes para o interior, e que exibem, com freqüência, uma altitude maior do que as áreas contíguas) tiveram papel importante na sedimentação e morfologia da plataforma (PETROBRAS, 2006a). A orientação L-W dos *grabens* da porção submersa, delineada desde a abertura dos continentes, definiu o padrão de isóbatas paralelo aos mesmos e também condicionou a morfologia da linha de costa atual (Costa Neto, 1997 *apud* PETROBRAS, 2006a).

As forçantes oceanográficas que agem nesta região, tais como, regime de mesomarés, energia de ondas moderada a alta, forte influência de correntes (na Plataforma Continental interna são direcionadas pelos ventos e marés e na Plataforma Continental externa pela ação inercial da CNB, ambas de W para NW) e ventos intensos e constantes, refletem sobre os processos hidrodinâmicos e sedimentares atuantes nesta plataforma (PETROBRAS, 2006a).

As correntes presentes, conforme afirma Santos (1998), não ultrapassam cerca de  $0,40 \text{ m.s}^{-1}$  na zona mais externa à costa, e são dominada por correntes de maré na zona interna. Nela observam-se, no setor mais externo, corpos do tipo dunas assimétricas de grande escala e, na parte mais interna, dunas simétricas formadas, possivelmente, por correntes de maré.

Conforme já citado, o litoral setentrional do Rio Grande do Norte caracteriza-se pela intensa ação de processos costeiros do meio físico e por forte influência de atividades antrópicas (indústrias petrolífera, salineira e de carcinicultura), dentre outras atividades sócio-econômicas relacionadas às populações locais (pesca e atividades portuárias) (Santos, 1998; Grigio *et al.*, 2002).

Atualmente, na área de estudo, a degradação dos manguezais e da planície de maré-estuarina (áreas naturais de recuperação deste ecossistema) é notável, conforme afirmaram Melo *et al.* (2005), o que

compromete as atividades ambientais direta ou indiretamente ligadas ao ecossistema manguezal.

O município de Guamaré (5°06'27"S e 36°19'13"W) tem como limites, ao norte, o Oceano Atlântico, ao sul, o município de Pedro Avelino, à oeste, o município de Macau, e à leste, o município de Galinhos. Seu território compreende uma área de 259,18 km<sup>2</sup> habitada por 8.149 pessoas (IBGE, 2000). Dentro deste município fluem os rios Camurupim e Catanduba que convergem para o sistema estuarino Guamaré-Galinhos. O rio Aratuá (ou rio Guamaré) também faz parte deste município. Nele se encontra localizado um porto/ancoradouro de intensa movimentação, com transporte de cargas e de pessoal entre a cidade de Guamaré e as plataformas de produção de petróleo situadas na zona costeira adjacente. O município de Galinhos também é composto por canais de maré que, na localidade, recebem o nome de rios Pisa-sal, Tomás e Galinhos (Lima, 2004).

A região de Guamaré faz parte da subzona climática João Câmara, que apresenta um índice pluviométrico da ordem de 400 mm e está inserida na Bacia Secundária do Litoral Norte. Os rios e riachos desta subzona são intermitentes e não chegam a atingir o mar, sendo o período de descarga nula maior que o período em que há escoamento. O pequeno volume de água superficial destes rios é perdido por evapotranspiração ou por infiltração no leito arenoso (Silveira, 2002).

As marés controlam a hidrografia da região estuarina, pois a maioria dos rios que compõem o estuário Guamaré-Galinhos corresponde a canais influenciados integralmente pela ação das marés, devido às poucas contribuições do continente por meio de drenagens (IDEMA, 2004a).

### **3.2. ESTUDOS OCEANOGRÁFICOS NA RCG**

A quantidade de trabalhos científicos realizados dentro da área de estudo e voltados mais diretamente aos aspectos oceanográficos é

relativamente restrita. Estes se encontram, em sua maioria, patrocinados pelo Governo do Rio Grande do Norte, onde uma grande parte dos trabalhos escritos está baseada na utilização de técnicas de sensoriamento remoto, e pela PETROBRAS. Esta última vem desenvolvendo, desde 2001, um importante Projeto de Monitoramento Ambiental da Bacia Potiguar, que tem possibilitado um maior acúmulo de conhecimento científico sobre a região. Fora do âmbito deste projeto, destacam-se também os trabalhos desenvolvidos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e pelo Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA).

No que se refere diretamente à oceanografia, Silva *et al.* (2003) estudaram a hidrodinâmica na área de dutos de Guamaré/RN e constataram que, com o aumento da profundidade, não há variação importante na salinidade e que a temperatura diminui, bem como a velocidade das correntes.

Ramos e Silva *et al.* (2004) realizaram um estudo nos estuários do litoral setentrional do RN em fevereiro de 2004. Estes autores constataram que os estuários de Guamaré e regiões adjacentes, tais como Galinhos e Açú-Piranhas, são hipersalinos classificando-os como estuários verticalmente bem misturados de acordo com a estratificação de salinidade. Tal constatação se deve à baixa influência das águas da descarga fluvial e de sua circulação e processos de mistura que são forçados principalmente pela co-oscilação da maré e pelo efeito baroclínico da força de gradiente de pressão.

De acordo com o IDEMA (2004a), o clima no litoral setentrional do RN é caracterizado pela grande incidência de energia solar e marcado por temperaturas do ar elevadas e pequenas variações no decorrer do ano, sendo novembro o mês mais seco. Neste levantamento, os ventos no estuário de Guamaré-Galinhos/RN apresentam predominância de leste (de setembro a abril) e de nordeste (de abril a setembro). As marés,

semidiurnas, controlam a hidrografia da região, uma vez que são poucas as contribuições da drenagem continental, que ocorrem apenas durante o período chuvoso. Ainda, próximo à zona costeira, o trem de ondas superficiais característico apresenta-se na direção NE-L. A temperatura média da água do mar é de 28°C e a salinidade alta, cerca de 38,2, devido principalmente à elevada evaporação local.

Silveira *et al.* (2003) realizaram o monitoramento sedimentológico da praia de Minhoto, próxima à Guamaré, e concluíram que esta se encontra no estado morfodinâmico intermediário onde predomina areia média a grossa na pós-praia e na zona de estirâncio, e areia média a fina na antepraia.

Ao estudar o *spit* (pontais ou esporões arenosos costeiros) de Galinhos, de dezembro de 1999 a agosto de 2001, Lima *et al.* (2006) concluíram que a morfologia desta área é muito frágil e suscetível às modificações anuais e fases da Lua (marés). No período anual, áreas que apresentaram recifes de arenito paralelos à costa preveniram as modificações morfológicas, no entanto, em áreas sem recifes houve uma tendência à erosão. Quanto às forças astronômicas, a deposição prevaleceu na Lua cheia (marés de sizígia).

A identificação das diferentes feições morfológicas do assoalho marinho desde a linha de costa até a isóbata de 1.000 metros, no trecho entre Galinhos e Ponta do Mel, foi realizada pela PETROBRAS (2006a). As principais características observadas foram campos de dunas de areia, vales incisivos e recifes.

Santos (1998) utilizou-se de técnicas de sensoriamento remoto para estudar os corpos submarinos arenosos, localizados entre os municípios de São Bento do Norte e Areia Branca. Neste estudo foram utilizados dados de sensoriamento remoto entre os anos de 1984 e 1990 a partir do sensor TM/Landsat-5. Os resultados mostraram mudanças importantes na linha da costa ao longo do tempo, como a presença dos seguintes tipos

de corpos arenosos: extensas dunas assimétricas (geradas por correntes unidirecionais) de cerca de 10 m de altura; extensas dunas de areia simétricas (geradas por maré); complexas ilhas barreiras/cristas de areia de origem desconhecida; substratos consolidados; e *spits* erosivos.

O mapeamento e interpretação da evolução do uso e ocupação do solo e vulnerabilidade do município de Guamaré/RN foram realizados por Grigio *et al.* (2002), durante os meses de janeiro/1996 e de janeiro/2001. Neste trabalho foi constatado o desaparecimento de salinas (cristalizadores e evaporadores) e o aparecimento de produção de camarão marinho numa extensa área, ao comparar as imagens de satélite de 1996 e 2001.

Em continuidade ao trabalho citado acima, Melo *et al.* (2005) produziram o mapeamento do uso e ocupação do solo e das unidades geoambientais em escala de 1:10.000 da região estuarina de Guamaré-Galinhos/RN, com base na interpretação de imagens multiespectrais de alta resolução obtidas pelo sistema IKONOS de imageamento. Este mapeamento permitiu a identificação e caracterização das formas de uso e ocupação do solo e das unidades geoambientais. Como resultado, estes autores concluíram que as maiores áreas de ocupação são os evaporadores de salinas (11,75%), as áreas alagadiças (8,26%) e os manguezais (7,16%) e que as unidades de maior área na região são a superfície de aplainamento ou de tabuleiro costeiro (25,51%) e a planície de maré estuarina (12,14%).

Grigio *et al.* (2005a) estudaram também a evolução da costa de Guamaré utilizando-se de sensoriamento remoto. Estes autores constataram que, nos períodos de 1998 a 2000 e de 2000 a 2001, os processos de acreção e erosão foram mais intensos, sendo a acreção mais importante no primeiro período e a erosão prevalecendo mais no segundo.

Com relação ao monitoramento de eventuais derramamentos de óleo na Bacia Potiguar, destaca-se o trabalho de Castro *et al.* (2003), que

elaboraram Mapas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo em áreas costeiras da porção setentrional do RN. Índices de sensibilidade do litoral foram identificados na área situada entre Galinhos e São Bento do Norte, nos meses de junho e dezembro/2000, utilizando-se dos dados espaciais armazenados em um banco de dados geográfico. Este estudo indica que o mês de dezembro seria potencialmente mais crítico do ponto de vista das conseqüências de um eventual derrame, quando comparado ao mês de junho. A maior sensibilidade ambiental é explicada por estes autores considerando a menor altura de ondas de superfície observada em dezembro, e a menor velocidade de dispersão do óleo nesta época. Na verdade, estes estariam se referindo aos menores níveis de turbulência associados em dezembro. Estas informações contradizem as observações relativas à variabilidade da ação eólica na região, conforme apresentado mais adiante.

O trabalho de daSilva *et al.* (2005) mostrou ser possível a geração dos Mapas de Sensibilidade ao Derramamento de Óleo (Mapas SAO) utilizando técnicas de processamento e interpretação de imagens de alta resolução IKONOS. Estes autores basearam-se na coleta de dados para o desenvolvimento de um banco de dados georreferenciados, o qual contribuiu para o monitoramento das atividades da indústria petrolífera situada entre as cidades de São Bento do Norte e Areia Branca, no litoral setentrional do Rio Grande do Norte.

Por fim, destacam-se também alguns projetos, em andamento ou finalizados (mas com dados coletados ainda não totalmente analisados), que buscam uma melhor compreensão da dinâmica da Bacia Potiguar. Trata-se do Projeto MARPETRO, o qual faz o monitoramento geoambiental das áreas costeiras; do Projeto ZEE/IDEMA, que se concentra no Zoneamento Ecológico Econômico dos estuários do Rio Grande do Norte; e do Projeto PETROMAR/PETRORISCO (FINEP/CNPQ/CTPETRO), que tem como objetivo o monitoramento ambiental das áreas de risco a derrames

de petróleo e derivados ao longo do litoral do Brasil, e que tem a região costeira de Guamaré como uma de suas áreas de estudo.

### **3.3. FORÇANTES METEOROLÓGICAS**

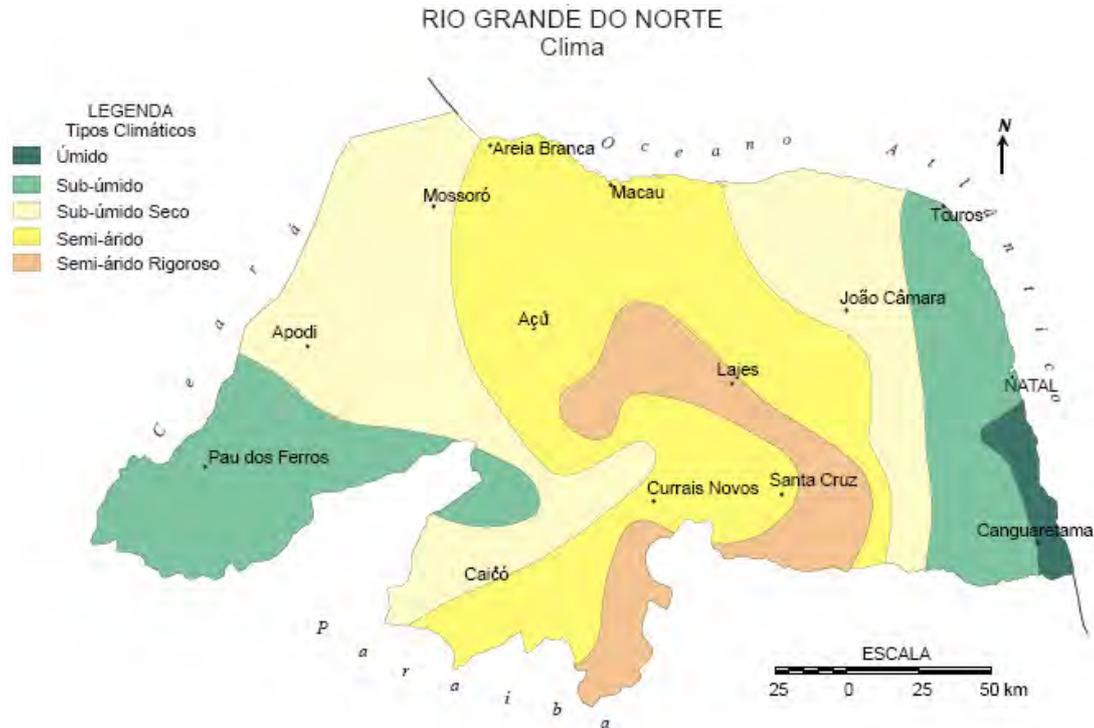
#### **3.3.1. Aspectos de macro e meso escalas**

O conhecimento das características meteorológicas é essencial para a análise e compreensão dos processos da dinâmica costeira, pois esta depende da interação de fatores dinâmicos, tais como, marés, ventos, correntes e ondas, com a zona litorânea.

De acordo com Moura *et al.* (2000), os dois sistemas meteorológicos principais que produzem a precipitação no Rio Grande do Norte são: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e as Ondas de Leste.

O litoral setentrional do Rio Grande do Norte é caracterizado por baixos índices de precipitação, em torno de 400 a 600 mm por ano (IDEMA, 2002), e vento com direção dominante de sudeste (Silva *et al.*, 2002), cujos meses de setembro a janeiro apresentam maiores intensidades (Santos, 1998). A baixa precipitação pluviométrica nesta região setentrional caracteriza o tipo de clima de semi-árido (Figura 3.2) apresentando chuvas distribuídas nos meses de janeiro a abril (IDEMA, 2002).

No período entre os meses de junho a julho ocorrem as menores temperaturas médias do ar que atingem cerca de 24 °C. Em geral, o mês de novembro corresponde à época sazonal mais quente do ano, com temperaturas máximas ultrapassando 40 °C. A umidade relativa do ar pode sofrer uma variação anual de 20%, permanecendo com valor médio em torno de 68%. A insolação neste litoral é das mais elevadas do Brasil, com médias anuais em torno de 2.600 horas.ano<sup>-1</sup> e 7,2 horas.diárias<sup>-1</sup>, medidas na Estação Meteorológica de Macau-RN entre 1961-1990 (Ramos e Silva *et al.*, 2004; IDEMA, 2004a).



**Figura 3.2.** Tipos climáticos no estado do Rio Grande do Norte. Fonte: IDEMA (2002).

A formação da ZCIT, de acordo com Eagleman (1985), ocorre com a confluência dos ventos alísios do hemisfério norte (alísios de nordeste) e os do hemisfério sul (alísios de sudeste). Tal confluência resulta em movimentos ascendentes do ar com alto teor de vapor d'água. Este último, por sua vez, se resfria e condensa ao subir na atmosfera, alcançando níveis mais frios. Em consequência disso, ocorre o aparecimento de nuvens numa faixa que é conhecida como tendo a mais alta taxa de precipitação do globo terrestre, com presença quase constante de nebulosidade. Este é o fenômeno mais importante na produção de chuvas na parte norte do Nordeste do Brasil (Coelho *et al.*, 2004), ocorrendo, principalmente, nos meses de março e abril e estando presente em muitos anos nos meses de fevereiro e maio. A variação na posição da ZCIT, durante a estação chuvosa, pode gerar períodos de estiagem ou de chuvas intensas sobre o sertão nordestino (Kousky, 1985). Assim, quando a ZCIT

não aparece na região nos meses de março ou abril, os estados sofrem com a redução de chuvas, principalmente o semi-árido do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.

Os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), também conhecidos como baixas frias (“*cold lows*”), causam precipitação no Nordeste do Brasil (Aragão, 1998) atuando sobre outras regiões do país, preferencialmente, nos meses de novembro a abril. Sua atuação é muito irregular, pois variam muito de posição e não possuem uma sub-região preferencial para atuar, podendo produzir tanto chuvas intensas como estiagens em qualquer região. As chuvas, na ocorrência deste fenômeno, acontecem nas bandas de nebulosidade que circundam o seu centro, porém, o movimento subsidente neste centro inibe a formação de nuvens. A permanência deste fenômeno pode ser na ordem de semanas, no entanto, caso o seu tempo de vida varie de uma a três semanas, os períodos de estiagens nas áreas abaixo do seu centro são denominados veranicos (Aragão, 1975).

Conglomerados de nuvens que se movem de leste para oeste sobre o Atlântico equatorial, denominados de Perturbações e Ondas de Leste, causam muita precipitação, principalmente nos meses de abril a agosto. As Ondas de Leste são muito freqüentes em alguns anos, sendo sua intensidade e freqüência dependentes da temperatura da superfície do mar (TSM), do cisalhamento meridional do vento e da circulação troposférica no Atlântico tropical (Leça *et al.*, 2004).

Apesar da sua pequena amplitude, as Ondas de Leste podem produzir chuvas intensas e inundações, principalmente em áreas costeiras, podendo penetrar até 400 km dentro do continente. A velocidade média de propagação desses sistemas é de 1.100 km.dia<sup>-1</sup> (Leça *et al.*, 2004). A intensidade dessas perturbações é melhor observada no nível de 700 hPa, ou seja, cerca de 3 km de altitude.

As frentes frias que chegam ao nordeste provenientes de regiões sub-antárticas ou instabilidades causadas pelo avanço desses sistemas

podem, em casos raros, provocar precipitação no Rio Grande do Norte e em Guamaré. Estes sistemas ocorrem com uma frequência de aproximadamente um a cada cinco dias no sul e sudeste do Brasil. Porém, apenas poucos desses sistemas ou parte deles penetram mais ao norte, alcançando o Rio Grande do Norte, não possuindo o gradiente térmico característico da região sul e sudeste do Brasil, apesar da temperatura do ar poder decrescer até 8 °C, conforme ocorreu no dia 13 de julho de 1964, quando esta temperatura chegou ao valor de 17,3 °C em Macau (Aragão, 2006).

A parte superficial de uma circulação térmica causada pelo aquecimento diferencial dos oceanos e da superfície sólida da Terra é denominada de brisa (Eagleman, 1985). Seu desenvolvimento ocorre quando o ar sobe sobre as áreas mais aquecidas elevando o ar úmido que condensa, o que leva à formação das nuvens e à produção das chuvas. Assim, a circulação se completa quando o vento superficial sopra das áreas mais frias (pressão atmosférica maior), quando o ar desce, para as mais quentes (pressão menor). Quando o vento superficial sopra da terra (superfície sólida) para o mar dar-se o nome de brisa terrestre, sendo freqüente à noite devido a terra resfriar-se mais rapidamente do que a água. Quando o vento sopra do mar para a terra denomina-se de brisa marítima, a qual ocorre mais durante o dia devido ao aquecimento solar ser maior na terra do que na água.

Na região tropical, os ventos alísios sopram, preferencialmente, do quadrante NE-SE. As brisas são melhor observadas nos meses de outono e inverno produzindo, em geral, chuvas de intensidade fraca a moderada. A região entre a costa e até 300 km continente adentro tem um máximo diurno de precipitação associado com a brisa marítima (Leça *et al.*, 2004), onde esta é máxima quando ocorre um contraste maior entre a TSM e a temperatura da terra, ou seja, no final do outono e no início do inverno (maio, junho e julho).

Na costa setentrional do RN, de acordo com Grigio *et al.* (2005b), ocorre uma exposição contínua à ação dos ventos alíseos que sopram de L e NE. Estes ventos geram a deriva litorânea, a qual transporta a areia da costa de L para O, como também transporta a areia da face praial formando campos de dunas costeiras (Silveira *et al.*, 2003).

### **3.3.2. Aspectos locais**

A variável meteorológica mais importante para o município de Guamaré é a precipitação. De acordo com a classificação geográfica climática do IBGE (2000), este município está situado na faixa climática “Tropical Zona Equatorial”.

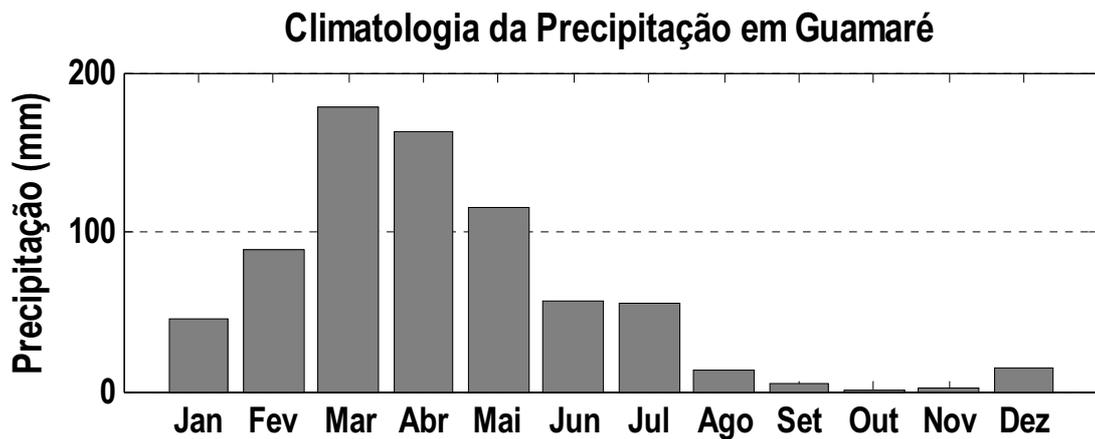
As chuvas de Guamaré ocorrem devido ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual se move meridionalmente durante o ano, às Perturbações e Ondas de Leste, aos VCAS e às brisas marítimas. Raramente, poucas chuvas são produzidas pelos avanços de frentes frias do sul.

A precipitação total média mensal de Guamaré (climatologia da precipitação de 1962 a 2005) é exibida na Figura 3.3 a seguir. Verifica-se que a precipitação total média anual é de 735,6 mm, onde o quadrimestre mais chuvoso vai de fevereiro a maio e o trimestre mais seco vai de setembro a novembro.

De acordo com as séries temporais de precipitação (mm) do período de 1963 a 2005, os três maiores valores do total anual foram os anos de 1974 (1942,4 mm), 1977 (1757,3 mm) e 1985 (2237,6 mm). O ano com maior precipitação, em relação ao mês de março (o mais chuvoso na média climatológica), foi o de 1986 (563,8 mm). A precipitação ultrapassou o valor de 300 mm em outros seis anos: 1967 (326,4 mm), 1968 (430,8 mm), 1974 (378,2 mm), 1981 (341,4 mm), 1984 (315,2 mm) e 1988 (324,7 mm).

Valores maiores do que a média climatológica nesses anos ocorreram devido a fenômenos de La Niña/Oscilação do Sul (LNOS) e do

Dipolo do Atlântico com modo favorável às chuvas. Nos anos de menores totais anuais de precipitação (1966, 1970, 1972, 1982, 1983, 1987, 1997, 1998), eventos de El Niño/Oscilação do Sul (ENOS) e do Dipolo do Atlântico desfavorável às chuvas foram os responsáveis pelo decréscimo na precipitação (Leça *et al.*, 2004).



**Figura 3.3.** Climatologia da precipitação em Guamaré – RN. Fonte: EMPARN (2007), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, <http://www.inmet.gov.br> (dados de 1962 a 2005).

Valores climatológicos de evaporação são de 2.354 mm anuais, ou seja, 3,2 vezes maior que os valores da precipitação total média climatológica. Assim, a evaporação do oceano adjacente “rouba” calor (energia) da superfície do mar, o que contribui para o balanço da TSM (temperatura da superfície do mar).

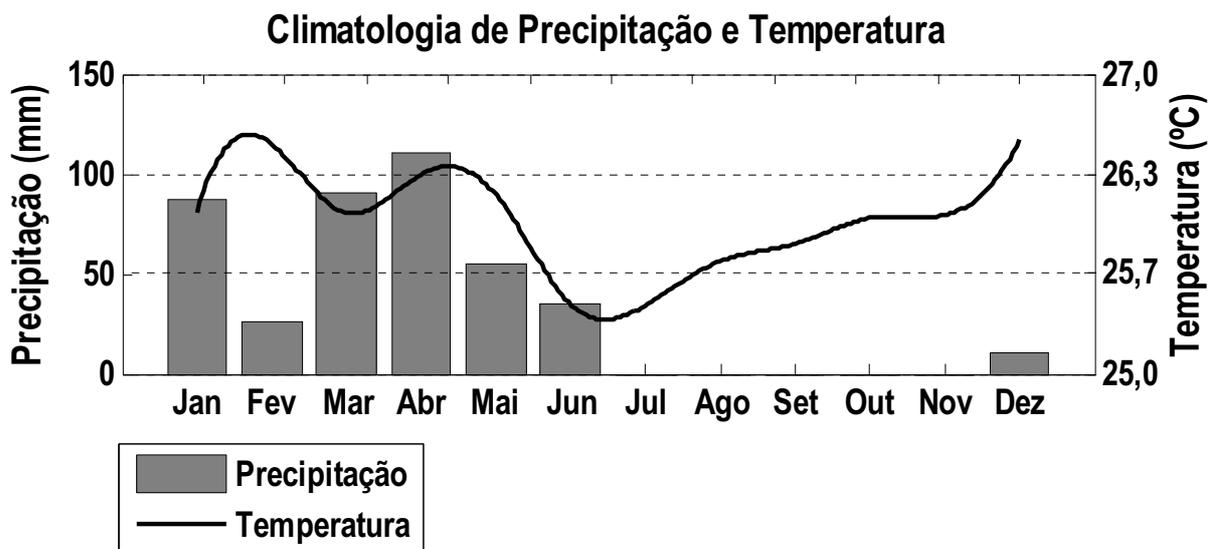
Os dados da estação de Macau foram utilizados para diagnosticar a temperatura do ar na área de estudo porque tal variável atmosférica, bem como os outros parâmetros descritos a seguir, não varia muito até 75 km de raio do centro da estação, onde o terreno é plano e sem elevações importantes.

Valores de temperatura do ar apresentam médias mensais variando de 26 a 28 °C, típico de regiões equatoriais. A temperatura do ar mínima

média anual é de 22,3 °C e a temperatura do ar máxima média anual é de 31,3 °C. Dependendo da forte insolação na ausência de sistemas meteorológicos atuantes ou com o avanço de frentes frias do sul, em dias isolados, podem ocorrer eventos onde a temperatura do ar seja superior aos 36 °C ou inferior aos 17 °C, respectivamente.

Na Figura 3.4 são exibidas as médias mensais da precipitação e da temperatura do ar no período de 2001 a 2004. Diante destes dados, observa-se um período chuvoso e mais quente (janeiro-maio), e um período totalmente seco e ligeiramente mais frio (julho a novembro) o que sugere uma quase polaridade da evolução climática sazonal da região.

A insolação totaliza 2.620 horas de brilho do Sol durante o ano (média climatológica), valores altos quando comparados com os valores em regiões tropicais como as florestas do Congo e da Amazônia.



**Figura 3.4.** Climatologia da precipitação e temperatura do ar em Guamaré – RN. Fonte: EMPARN (2007), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, <http://www.inmet.gov.br> (dados de 2001 a 2004).

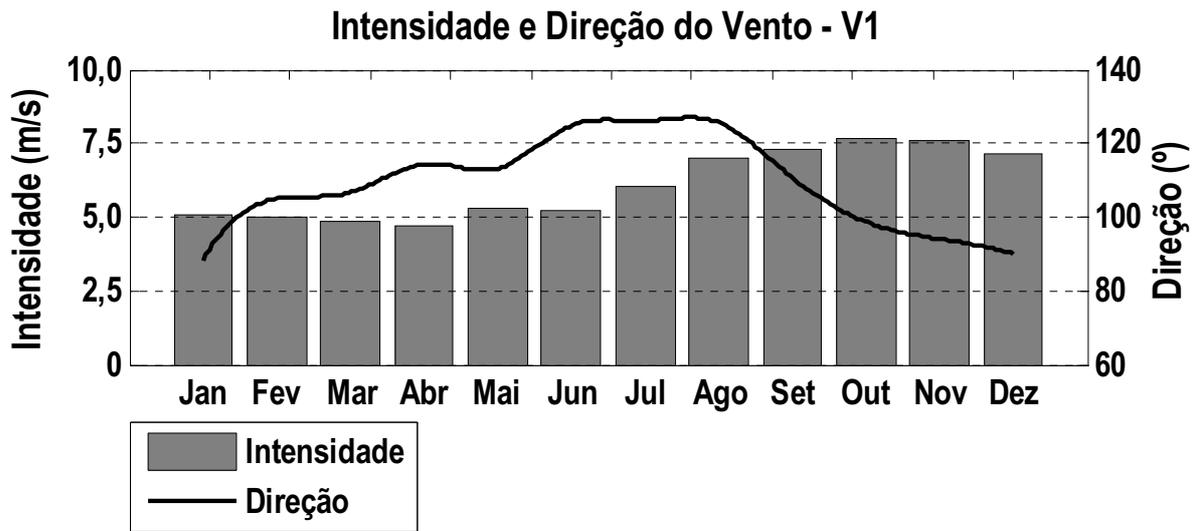
Como característica das regiões equatoriais, onde a pressão atmosférica não muda à exceção das regiões sob a influência dos ciclones

tropicais, a pressão atmosférica apresenta valores médios mensais de 1010,4 hPa (fevereiro) a 1013,7 hPa (julho).

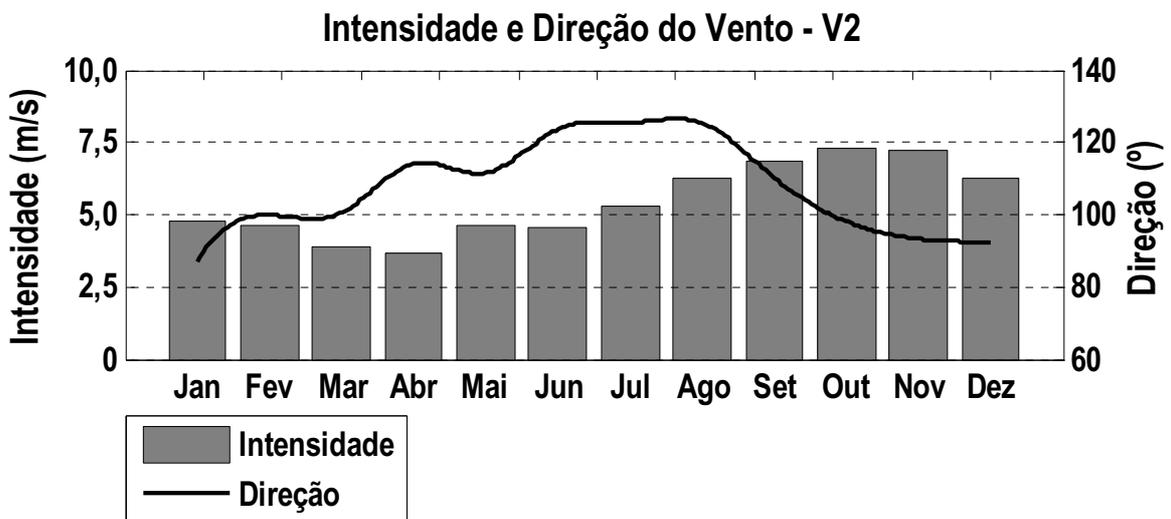
As médias mensais climatológicas de umidade relativa exibem valores entre 68 a 76%, alcançando valores próximos dos 100% em dias chuvosos e próximos de 50% em ocasiões de forte insolação e ventos fracos.

A oscilação dos ventos nesta área ocorre em escala de dias, semanas e meses. Como podem ser observados nas Figuras 3.5 e 3.6, os ventos de leste menos intensos predominam no período mais chuvoso e quente do ano (janeiro a maio); enquanto ventos mais fortes predominam no período seco e mais frio (julho a novembro), oscilando entre leste e sudeste.

Tais informações foram obtidas a partir de registros de intensidade e direção dos ventos de duas estações, Macau-A (05°05'03,7" S e 36°30'53,3" W – de agosto/2001 a agosto/2004) e Macau-B (05°05'22,4" S e 36°22'51,0" W – de setembro/2003 a fevereiro/2006), operadas pela PETROBRAS (2006b). Em cada uma destas estações os anemômetros realizavam leituras, a cada 10 minutos, da direção e intensidade dos ventos. Este último medido em dois níveis, a uma altura de 40 metros (V1) e 20 metros (V2) em Macau-A, e de 46 metros (V1) e 30 metros (V2) em Macau-B.



**Figura 3.5.** Climatologia do vento (anemômetro V1) em Macau – RN. Fonte: PETROBRAS (2006b) (dados de 2001 a 2006).



**Figura 3.6.** Climatologia do vento (anemômetro V2) em Macau – RN. Fonte: PETROBRAS (2006b) (dados de 2001 a 2006).

# Capítulo 4

## Abordagem Metodológica

### 4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS COSTEIROS

Algumas ferramentas vêm sendo bastante utilizadas como forma de abordagem para caracterizar os ambientes marinhos e para buscar um melhor entendimento de seus processos físicos, geológicos, meteorológicos, químicos e biológicos. Uma das opções para um maior conhecimento da hidrodinâmica em corpos de água é a modelagem matemática, que possibilita não apenas a simulação das condições atuais do ambiente estudado, mas também a análise e previsão de situações futuras. Modelos são, portanto, ferramentas integradoras utilizadas para obter uma visão dinâmica de processos dos sistemas ambientais.

Em geral, os dados obtidos *in situ* são desprovidos de informações suficientes para diagnósticos, gestão ou desenvolvimentos de projetos sobre recursos naturais. Isto se deve ao alto custo para o levantamento de informações de campo e, conseqüentemente, os valores são medidos em poucos pontos distribuídos na região de interesse. Dessa forma, a utilização de modelos é imprescindível para propiciar o entendimento da dinâmica global da área em situações onde dados foram medidos em pontos isolados.

Os modelos hidrodinâmicos e de transporte de escalares têm sido amplamente utilizados para caracterizar padrões hidrodinâmicos e de transporte de contaminantes em análises de impactos ambientais, planos de contingência e diagnósticos de ambientes naturais.

De forma sintética, a modelagem matemática de sistemas naturais engloba um conjunto de equações capazes de reproduzir tanto a dinâmica de um escoamento quanto os processos físico-químicos que fazem parte do transporte de uma grandeza escalar. Estas equações normalmente são acopladas, não lineares e raramente possuem solução analítica conhecida devido à complexidade dos escoamentos naturais e dos processos envolvidos. A solução destas equações é obtida através de técnicas numéricas, as quais consistem basicamente na representação de um domínio contínuo em um domínio discreto, transformando equações diferenciais em sistemas algébricos cujas soluções podem ser obtidas por algoritmos computacionais (Rosso, 1996).

O uso de modelos computacionais neste estudo dá enfoque a rotinas para previsão de escoamentos de corpos de água (quantidade), também conhecidos como “modelos hidrodinâmicos”.

A ferramenta computacional utilizada neste estudo foi o modelo SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) que é fruto do desenvolvimento conjunto da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica e da Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação - ambos pertencentes à Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rosman, 2001). Em sua forma completa, o SisBaHiA é um sistema para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares ativos e/ou passivos em corpos de água naturais, tais como rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras.

## 4.2. O MODELO SISBAHIA

Para descrever o modelo de circulação 3D utilizado neste estudo foram consultados, principalmente, a Referência Técnica do SisBaHiA (Rosman, 2005), o capítulo 1 do livro Métodos Numéricos, volume 5, coleção ABRH (Rosman, 2001) e o Manual do Usuário do SisBaHiA (COPPE, 2004). Sendo assim, para esta Seção, estas são as três publicações indicadas como referência para um maior aprofundamento da base teórica e desenvolvimento numérico.

O SisBaHiA é um sistema profissional de modelos computacionais para estudos e projetos em uma vasta gama de corpos de água naturais. Desde 1986, novas versões deste sistema vêm sendo continuamente implementadas no COPPE/UFRJ. Dissertações e teses (Malta, 2005; Trento, 2005; Soto, 2004; Feitosa, 2003; Amaral, 2003; Gabioux, 2002), bem como publicações em periódicos (Cunha *et al.*, 2006; Gabioux *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2002), têm sido desenvolvidas, desde então, utilizando este sistema.

Este sistema computacional se divide em diversos módulos, dentre eles o hidrodinâmico, o de transporte Lagrangeano (probabilístico e determinístico), o de transporte Euleriano, o de qualidade de água e o de geração de ondas. Ainda, este disponibiliza diversas ferramentas (tais como, gerenciador de animações, conversor de tempo entre dados, e cópia de malhas e modelos) que são integradas em uma interface de trabalho amigável e também interage diretamente com os programas de pré- e pós-tratamento de dados. Neste estudo, apenas os módulos hidrodinâmico e de transporte Lagrangeano (probabilístico e determinístico) foram utilizados.

O modelo hidrodinâmico é um módulo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH dominado por forçantes barotrópicos e otimizado para corpos de água naturais onde possam ser desprezados os efeitos de densidade variável.

O módulo de transporte Lagrangeano é utilizado para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, como, por exemplo, lançamento de efluentes e derrame de óleo, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH (determinístico). Acoplado a este é possível obter resultados probabilísticos computados a partir de vários eventos ou de resultados ao longo de um determinado período, como, por exemplo, probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite e probabilidade de toque no litoral. O padrão de fluxo de um fluido é considerado Lagrangeano, segundo Pond & Pickard (1983), quando é descrita a trajetória de cada partícula fluida, especificando quando cada partícula alcança cada ponto no seu caminho.

O módulo de transporte Euleriano é um módulo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. O padrão de fluxo de um fluido é considerado Euleriano quando é descrita a velocidade (intensidade e direção) em cada ponto no fluido a cada instante de tempo.

### **4.3. O MÓDULO HIDRODINÂMICO EULERIANO**

Modelagem hidrodinâmica nada mais é do que a determinação da quantidade de movimento da água, a qual resulta na definição dos padrões de corrente. O módulo hidrodinâmico é a base fundamental para qualquer modelo usado para analisar a circulação em corpos de água naturais.

Tal módulo no SisBaHiA segue a linhagem FIST (*Filted in Space and Time*), onde a modelagem da turbulência do modelo hidrodinâmico é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação dos Grandes Vórtices (*Large Eddy Simulation*). Para o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA o modelo adotado foi o FIST3D que é um

modelo numérico hidrodinâmico tridimensional para escoamentos de grande escala e homogêneos.

Esta versão 3D da linhagem FIST resolve as equações de *Navier-Stokes* considerando a aproximação da pressão hidrostática. A técnica numérica desta versão divide-se em dois módulos. Primeiramente, calcula-se os valores de elevação da superfície livre através de uma modelagem bidimensional integrada na vertical (2DH) e, em seguida, calcula-se o campo de velocidades que pode ser computado de modo tridimensional (3D) ou bidimensional (2DH), dependendo dos dados de entrada.

A discretização temporal ocorre, implicitamente, através de diferenças finitas. A discretização espacial é feita de forma preferencial por elementos finitos quadrangulares biquadráticos, podendo também ser feita por elementos finitos triangulares quadráticos ou ambos.

De acordo com Scudelari (1997), o método das diferenças finitas tem como principal vantagem a simplicidade e a eficiência computacional ao ser aplicado em malhas uniformes, caso contrário, tal eficiência é bastante reduzida. Já o método dos elementos finitos é vantajoso devido a sua adaptabilidade às malhas não estruturadas, mas sua formulação é um pouco complexa, quando comparada com o método das diferenças finitas.

Já a discretização vertical da coluna de água faz uso das diferenças finitas com transformação sigma, ou seja, utiliza coordenadas sigma (adimensionais) para representar a coordenada cartesiana vertical  $z$ . Assim, distorções nas profundidades de amostragem que ocorrem durante um ciclo completo de maré, as quais são ocasionadas por flutuações periódicas da espessura da coluna d'água, podem ser corrigidas pela transformação sigma. Tal versatilidade traz grande facilidade computacional ao ser utilizada em regiões costeiras, áreas estas caracterizadas por fortes gradientes topográficos.

O modelo hidrodinâmico utiliza, preferencialmente, interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do

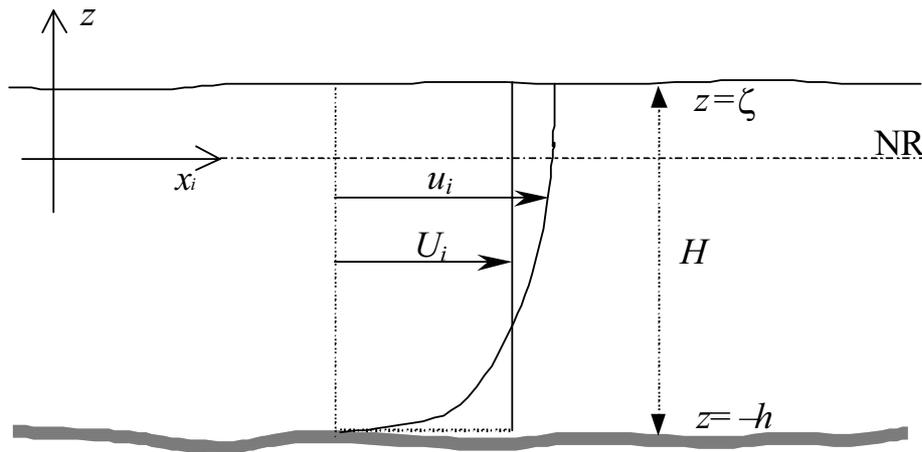
fundo. No entanto, a interpolação seguirá o tipo de elemento utilizado na discretização.

O tratamento da turbulência baseia-se em técnicas de filtragem, conforme mencionado acima, e é auto-ajustável na escala de sub-malha.

Para este estudo foi utilizada a modelagem 3D, que acopla os dois módulos hidrodinâmicos, o promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH) e o 3D, o qual calcula o campo de velocidades tridimensional através do módulo analítico-numérico, no caso deste estudo. Para uma abordagem tridimensional (3D), estes dois módulos tornam-se interdependentes. Assim, as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH são utilizadas pelo módulo 3D que, por sua vez, calcula as tensões de atrito no fundo obtidas dos perfis verticais de velocidade e que são usadas pelo módulo 2DH.

#### **4.3.1. Equações básicas**

O sistema de coordenadas usado para as modelagens 3D e 2DH é esquematizado na Figura 4.1 a seguir, onde as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como  $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$  e  $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$  utilizando o índice  $i = 1, 2$ . Para a modelagem 2DH,  $U_i$  representa a velocidade promediada na vertical.



**Figura 4.1.** Sistema de coordenadas da modelagem 3D e 2DH, onde NR é o nível de referência. Fonte: Rosman (2001).

### (a) Módulo 3D

Os modelos matemáticos que descrevem o movimento de um fluido são simplificações das equações de *Navier-Stokes*, as quais representam a equação de conservação da quantidade de movimento, em conjunto com a equação de continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado (Rosman, 2001; Soto, 2004).

A equação da conservação da quantidade de movimento para escalas resolvíveis para as 3 direções, considerando um referencial Euleriano, é escrita abaixo.

Equação da quantidade de movimento na direção  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \text{sen} \theta v \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento na direção  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \text{sen} \theta u \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento na direção  $z$ :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_o} g \quad (3)$$

onde  $u, v, w$  são as componentes do vetor velocidade nas direções  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , respectivamente. A direção vertical  $z$  é positiva para cima e sua origem pode ser convenientemente definida no nível médio da superfície da água.  $P$  é a pressão,  $\rho$  é a densidade local do fluido e  $\rho_o$  é uma densidade constante de referência.  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com  $\Phi$  são as forças de *Coriolis*, no qual  $\theta$  é o ângulo de Latitude.  $\tau_{ij}$  é o tensor de tensões turbulentas e é expresso por:

$$\tau_{ij} = \nu_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [i, j = 1, 2, 3] \quad (4)$$

Com a intenção de reduzir o tamanho da equação, a notação indicial é utilizada na equação acima, onde considera  $(x, y, z) \equiv (x_1, x_2, x_3)$  e  $(u, v, w) \equiv (u_1, u_2, u_3)$ .

A compressibilidade da água é mínima sob condições normais na natureza, ou seja, a água comporta-se como fluido incompressível no meio ambiente. Assim, um escoamento incompressível em um corpo d'água deve ser interpretado como “escoamento de um fluido comportando-se de forma incompressível”, uma vez que qualquer fluido é compressível.

Desta forma, a equação da continuidade (do volume, por ser escoamento ambiental) representa a imposição da condição de escoamento incompressível e é expressa por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Quando as escalas dos movimentos horizontais são de ordem  $n$ -vezes maior do que a profundidade, os escoamentos são considerados de grande escala e também podem ser chamados de escoamentos quase

horizontais ou escoamentos em águas rasas. Nestes casos, as equações governantes do movimento são chamadas equações de águas rasas.

Para estes escoamentos, uma densidade constante pode ser considerada em todos os termos destas equações, exceto no termo que considera a aproximação *Boussinesq* (empuxo). No entanto, o empuxo pode ser desconsiderado se a coluna de água for bem misturada não se aplicando, assim, a equação de estado e as respectivas equações de transporte para os constituintes.

Ainda, a equação de quantidade de movimento na direção vertical pode ser reduzida à aproximação hidrostática, ou seja, é desprezada a pressão dinâmica por estar considerando escoamentos de águas rasas. Para isso, integra-se a equação da quantidade de movimento na direção  $z$  (3) que é expressa como:

$$P(z) = P(\zeta) + \int_{\zeta}^z \rho g dz + P_d \quad (6)$$

A aproximação hidrostática para a pressão em qualquer profundidade  $z$ , ao considerar a densidade constante ( $\rho = \rho_0$ ), pode ser obtida ao integrar a equação (6) acima, resultando em:

$$P(z) = P_{atm} + \rho_0 g (\zeta - z) \quad (7)$$

Considerando que a pressão atmosférica  $P_{atm}$  permanece praticamente homogênea quando esta se encontra em domínios relativamente pequenos e utilizando a equação (7) acima nas equações da quantidade de movimento na direção  $x$  (1) e  $y$  (2), a equação da quantidade de movimento efetivamente usada no modelo hidrodinâmico pode ser obtida conforme exibida abaixo.

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta \quad (8)$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (9)$$

No entanto, diante das 3 equações descritas – (5), (8) e (9) – há 4 incógnitas ( $u, v, w, \zeta$ ) sendo, então, necessária uma quarta equação. Para tanto, é obtida uma equação para  $\zeta$  ao integrar a equação da continuidade ao longo da vertical e utilizando, em seguida, a regra de *Leibniz*, as condições de contorno cinemáticas, bem como considerando o fundo com topohidrografia fixa durante o período de simulação, ou seja,  $z = -h(x, y)$ . Sendo assim:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (10)$$

Assim, as equações governantes necessárias para calcular as quatro incógnitas ( $u, v, w, \zeta$ ) da circulação hidrodinâmica no módulo 3D, observadas na Figura 4.1, para escoamentos em águas rasas se resumem à equação da continuidade (5), às equações da quantidade de movimento horizontais na direção  $x$  (8) e  $y$  (9), e à equação da continuidade promediada na vertical (10).

O módulo 3D calcula diretamente as tensões verticais atuando nos planos horizontais ( $\tau_{iz}$ ). Porém, os efeitos de tensões horizontais atuando em planos verticais, ( $\tau_{xx}, \tau_{xy} = \tau_{yx}$  e  $\tau_{yy}$ ) são indiretamente incluídos neste. Contudo, estes mesmos efeitos são totalmente incluídos no módulo 2DH.

As tensões de atrito vertical para o SisBaHiA são modeladas como:

$$\tau_{iz} = \nu_{iz} \left( \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) \quad [i = 1, 2] \quad (11)$$

A viscosidade turbulenta,  $\nu_{i3}$ , é calculada utilizando uma distribuição parabólica bem conhecida ao longo da vertical:

$$v_{i3} = k|u_*|_i (z+h) \left(1 - \frac{z+h}{H}\right) \quad (12)$$

onde,  $H(x, y, t) = h(x, y) + \zeta(x, y, t)$  é a profundidade total instantânea, o parâmetro  $k$  é a constante de *Von Karman* e  $u_*$  é a velocidade de atrito característica.

### (b) Módulo 2DH

As equações governantes deste módulo 2DH originam-se da integração vertical analítica das equações governantes do modelo hidrodinâmico tridimensional, onde as dimensões do problema são reduzidas ao plano horizontal.

As elevações da superfície livre  $z = \zeta(x, y, t)$  e as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$  –  $U(x, y, t)$  e  $V(x, y, t)$ , respectivamente – são determinadas pelo módulo 2DH para cada passo de tempo. Tais componentes da velocidade são definidas pelas seguintes promediações:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad \text{e} \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz \quad (13)$$

A equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical para um escoamento 2DH, considerando tais promediações acima (13) e uma batimetria permanente durante o período de simulação,  $z = -h(x, y)$ , pode ser definida como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

As condições de contorno cinemáticas dizem respeito às superfícies, livre e no fundo, onde estas são consideradas permanentes, ou seja, elas não se movem como um todo. Assim, pode ser dito que a velocidade global destas superfícies é igual a zero ou mesmo dizer que sua posição global não varia ao longo do tempo.

Portanto, para obter as equações de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, nas direções  $x$  e  $y$ , integra-se as equações de quantidade de movimento 3D (8) e (9) utilizando a regra de *Leibniz* e as condições de contorno cinemáticas. Assim, definem-se tais equações 2DH nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V \quad (15)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U \quad (16)$$

onde,  $\tau_i^S$  e  $\tau_i^B$  são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente.

O cisalhamento turbulento decorrente da ação eólica é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática, o que é comum em modelos de escoamento com superfície livre, ou seja:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad [i=1, 2] \quad (17)$$

onde, a notação indicial é utilizada considerando  $i=1$  que representa  $x$  e  $i=2$  que representa  $y$ .  $\tau$  [Pa] é a tensão de cisalhamento superficial induzida pela ação do vento;  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\cong 1,5 \text{ kg.m}^{-3}$ );  $W_{10}$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ] é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre; e  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ .  $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento, cuja fórmula adotada é a apresentada por Wu (1982):  $C_D = (0,80 + 0,065 W_{10}) \times 10^{-3}$ .

Já o cálculo da tensão de atrito no fundo dar-se através da seguinte expressão:

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i \quad [i=1,2] \quad (18)$$

onde, devido à modelagem 3D ter sido usada neste estudo e, portanto, o módulo 2DH estar acoplado ao 3D,  $\beta$  depende da velocidade de atrito característica  $u_*$ , a qual é função do perfil de velocidade 3D.

Assim:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (19)$$

onde,  $C_h$  é o coeficiente de Chézy e é definido por:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (20)$$

sendo a rugosidade equivalente no fundo representada por  $\varepsilon$ .

#### **4.4. O MÓDULO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO**

O modelo Lagrangeano é ideal para simular o transporte de escalares que estejam flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água. Ele é eficiente para situações em que as fontes são de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, assim como também em situações com fortes gradientes. Tal eficiência se deve ao fato deste modelo utilizar os campos de velocidade gerados pelo modelo hidrodinâmico sem restringir-se à escala de resolução imposta pela grade de discretização do mesmo.

Para este modelo, as fontes contaminantes são representadas por um número finito de partículas lançadas, e dispostas aleatoriamente, na região fonte a cada intervalo de tempo. O lançamento das partículas pode ser instantâneo, por intervalo especificado ou contínuo, inclusive com vazão variável.

A trajetória das partículas é calculada através da soma de um componente determinístico (advecção), o qual usa as velocidades e a elevação da superfície fornecidas pelo modelo hidrodinâmico 2DH, e outro

aleatório independente (difusão turbulenta), representado por um pequeno deslocamento aleatório na posição da partícula (Horita, 1996).

O transporte advectivo das partículas lançadas em cada instante é definido pela trajetória de cada partícula, onde a expansão em série de *Taylor* é utilizada para calcular a posição de uma partícula no instante seguinte ( $P^{n+1}$ ) a partir da posição anterior ( $P^n$ ). Tem-se, então:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T.A.D. \quad (21)$$

onde, T.A.D. são termos de alta ordem desprezados.

A partir do campo de velocidades resultantes do modelo hidrodinâmico são obtidas as derivadas temporais da posição  $P$  da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \vec{V}(u, v, w) \\ \frac{d^2 P}{dt^2} &= \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \end{aligned} \quad (22)$$

admitindo-se que, nas escalas resolvíveis, as velocidades para o transporte advectivo das partículas,  $\vec{V}(u, v, w)$ , são as mesmas das velocidades das correntes do modelo hidrodinâmico.

As partículas são consideradas pontos discretos que apresentam a mesma quantidade de massa no instante do lançamento, onde o somatório da massa das partículas neste instante equivale à massa total de poluente lançada no corpo d'água. Ou seja, a relação entre a quantidade de partículas lançadas e a carga do poluente num determinado instante (concentração x vazão da fonte) permite calcular a massa de cada partícula.

Assim, para efluentes saindo de uma fonte, a massa ( $M_a$ ) do efluente  $a$  em cada partícula lançada é determinada por:

$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta t}{N_p} \quad (23)$$

onde,  $Q$  é a vazão na fonte com concentração  $C_a$  de um contaminante  $a$ , e  $N_p$  é o número de partículas que entra no domínio através da fonte a cada passo de tempo  $\Delta t$ .

Depois de determinada a nova posição de cada partícula, pode ser incluído um desvio aleatório provocado por movimentos em escalas não resolvíveis geradores de “velocidades turbulentas”. A magnitude de tal desvio é função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas, cuja difusividade se divide em duas partes: uma que acrescenta incerteza à advecção e outra estritamente difusiva.

Para o modelo Lagrangeano de transporte de partículas há dois tipos de condições de contorno: contorno aberto e contorno de terra. O primeiro se dá quando uma partícula atravessa um seguimento de contorno saindo, assim, do domínio e sendo, conseqüentemente, perdida. O segundo tem duas situações a serem consideradas. A situação padrão ocorre quando a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem perder massa. A outra situação é quando um coeficiente de absorção é definido e a partícula que atinge a fronteira retorna ao meio, mas parte de sua massa fica no trecho atingido da fronteira.

## **4.5. APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO**

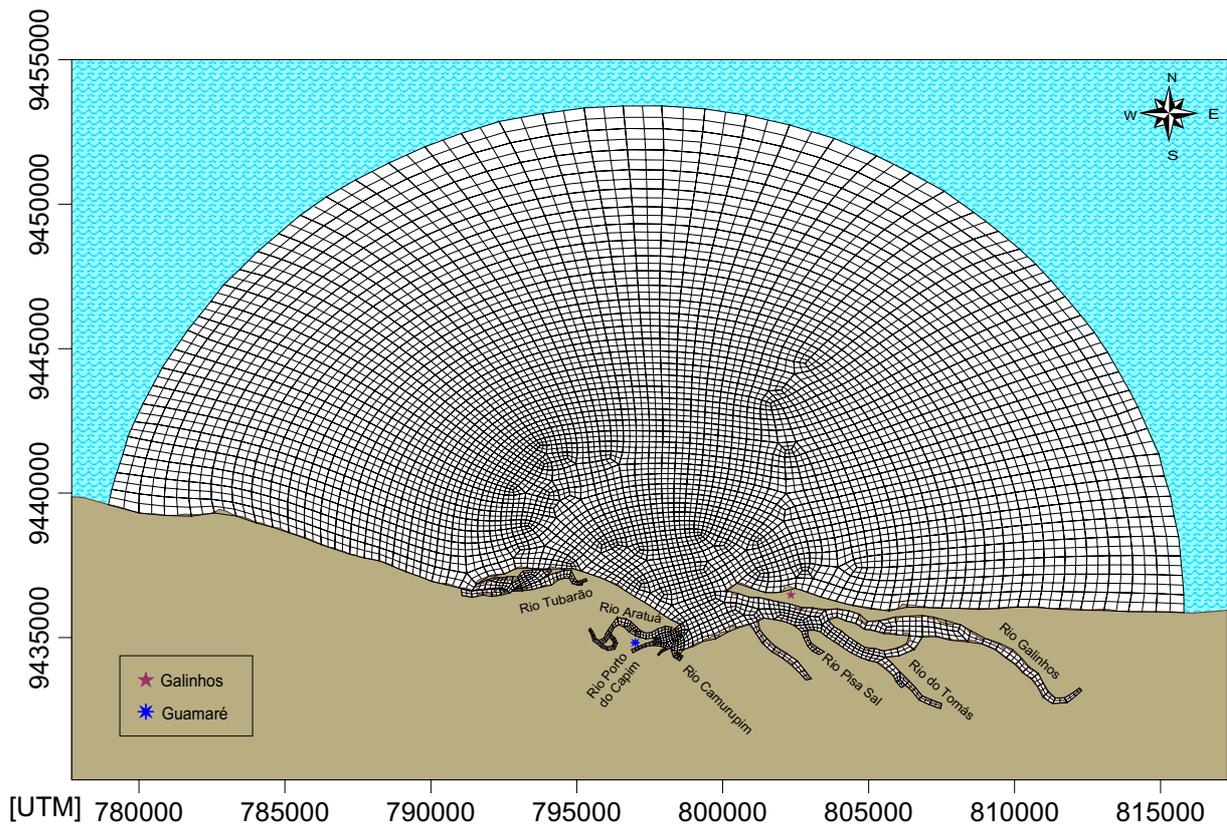
### **4.5.1. Malhas de discretização espaço-temporal**

O domínio modelado compreende a área entre as coordenadas 9.432.534,80 e 9.453.404,10 N, cobrindo aproximadamente 19 km da plataforma a partir do ponto mais *offshore*; e 778.957,36 E (próximo à Diogo Lopes) a 815.799,78 E (um pouco além de Santa Isabel), os quais distam aproximadamente 37 km.

O modelo SisBaHiA utiliza malhas de discretização espacial em elementos finitos, as quais são criadas a partir de programas auxiliares de interpolação. Os métodos mais comuns para a integração das equações a derivadas parciais que governam as características hidrodinâmicas, cinemáticas e os processos de transporte nos sistemas costeiros, são os métodos das diferenças finitas e o dos elementos finitos (Miranda, 1984). Em ambos os casos, o volume total do corpo d'água é subdividido em volumes parciais por meio de uma rede de grades, convenientemente definidas. A intersecção dessas grades determina os chamados pontos nodais (ou nós), nos quais as soluções das equações são determinadas.

A malha horizontal gerada para a RCG e utilizada nas simulações é apresentada na Figura 4.2. São utilizados para a discretização do domínio modelado 1.794 elementos finitos, contendo 7.555 nós, dos quais 649 são do contorno de terra e 113 da fronteira aberta. Na determinação da malha vertical foram consideradas 21 camadas, distribuídas uniformemente da superfície ao fundo, resultando em 158.655 pontos de cálculo.

Todas as simulações foram realizadas com um intervalo de tempo de integração ( $\Delta t$ ) de 60 segundos, onde foi obtido o valor médio 3,0 de número de *Courant*.



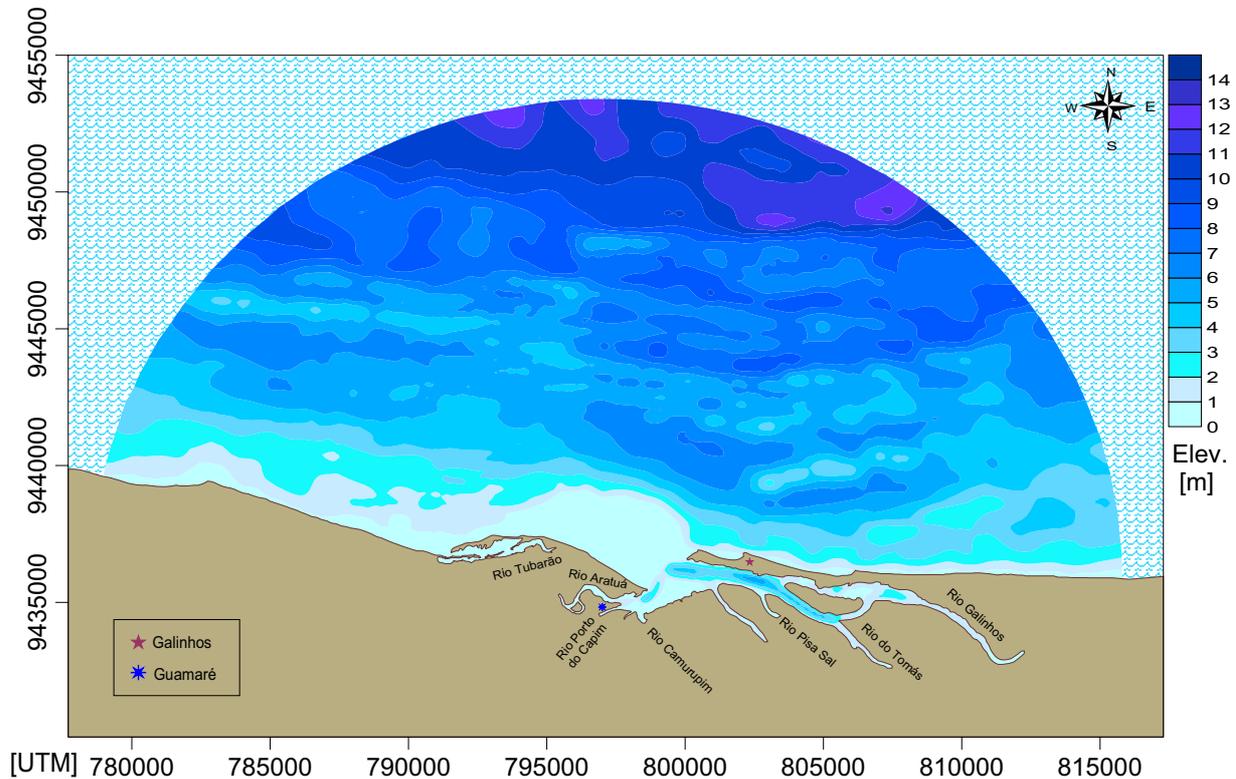
**Figura 4.2.** Malha de discretização do domínio modelado da RCG.

#### 4.5.2. Batimetria

As informações dos dados batimétricos utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de duas fontes: PETROBRAS (2006a) e IDEMA (2004b). A profundidade máxima do domínio estudado foi 13,27 metros. A Figura 4.3 ilustra a batimetria da região do domínio modelado, a qual foi interpolada pelo método *Kriging* (baseia-se na diferença da variância com o aumento da distância entre dois pontos).

Para a área da Plataforma Continental interna, as informações de batimetria utilizada foram provenientes do levantamento batimétrico detalhado realizado pela PETROBRAS (2006a) na região costeira da Bacia Potiguar. A malha deste levantamento batimétrico foi realizada em perfis aproximadamente perpendiculares à costa associados a perfis

longitudinais, a uma distância de 1 km entre cada perfil. Foram, então, levantados 197 perfis batimétricos, inclusive os de Guamaré, totalizando aproximadamente 2.930 km. Cerca de 20.000 pontos foram adquiridos a cada minuto com coordenada e profundidade conhecidas.



**Figura 4.3.** Batimetria da RCG.

Para a área estuarina Guamaré-Galinheiros, as informações batimétricas foram obtidas do IDEMA (2004b). O levantamento batimétrico foi realizado em linhas espaçadas de 100 x 100 metros utilizando a eco-sonda modelo *Hidrotrac* da *Odom*. A localização dos dados foi obtida com DGPS (*Differential Global Positioning System*). Tal levantamento resultou em 268 perfis batimétricos transversais e longitudinais ao eixo do canal de Galinhos, formando uma malha regular com aproximadamente 8.000 pontos; e 84 perfis batimétricos transversais e 4 longitudinais ao eixo do canal do estuário de Guamaré, formando uma malha regular com aproximadamente 1.000 pontos.

### **4.5.3. Cisalhamento eólico**

A forçante eólica considerada nas simulações foi estimada com a obtenção do vetor velocidade de vento médio, calculado a partir dos registros de intensidade e direção dos dados meteorológicos efetuados pela PETROBRAS (2006b).

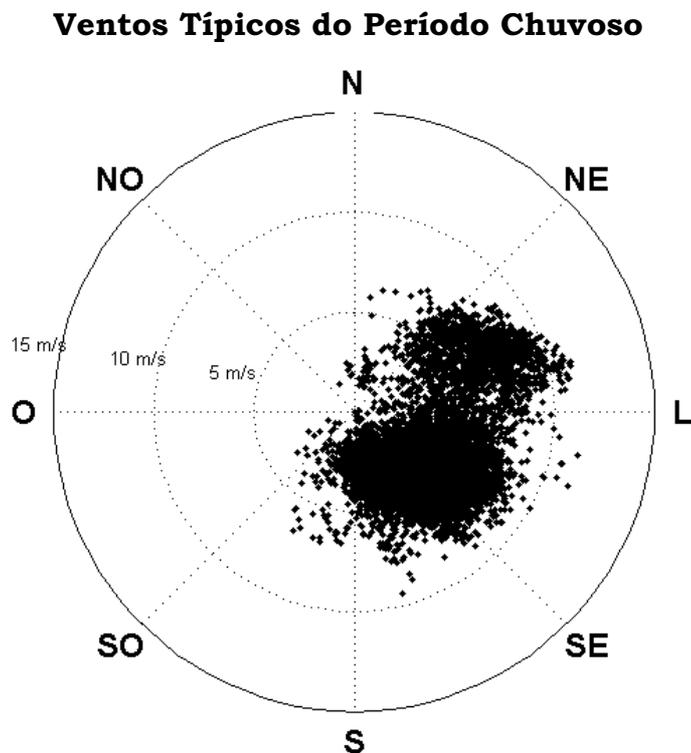
Estes dados foram determinados a partir de duas estações, Macau-A (05°05'03,7" S e 36°30'53,3" W – de agosto/2001 a agosto/2004) e Macau-B (05°05'22,4" S e 36°22'51,0" W – de setembro/2003 a fevereiro/2006). Em cada uma destas estações os anemômetros realizavam leituras, a cada 10 minutos, da temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e da direção e intensidade dos ventos. Este último medido em dois níveis, a uma altura de 40 metros (V1) e 20 metros (V2) em Macau-A, e de 46 metros (V1) e 30 metros (V2) em Macau-B.

Foram também obtidos dados meteorológicos e climatológicos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia/INMET (<http://www.inmet.gov.br>), e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/CPTEC, localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE (<http://www.cptec.inpe.br>), com o propósito de realizar uma análise da sazonalidade típica da região.

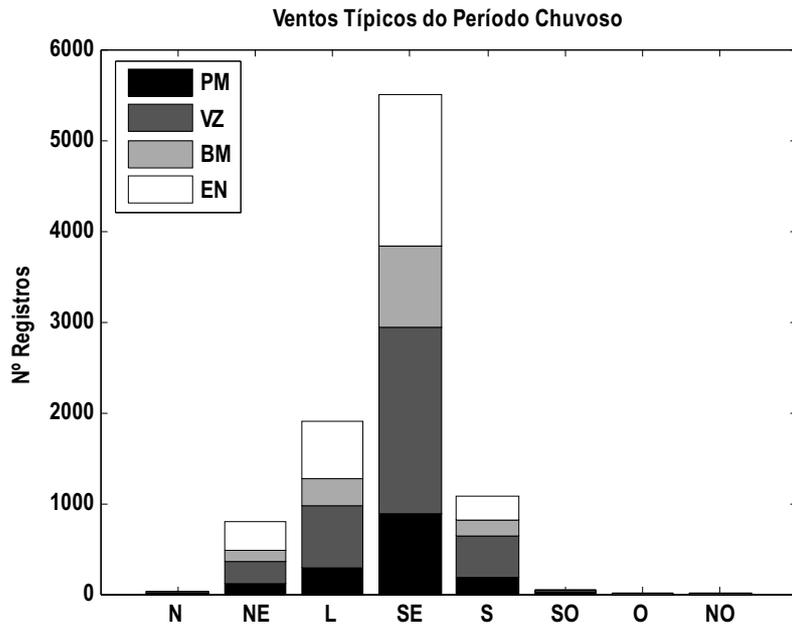
A estação de Macau (5°6,900' S e 36°45,000' W, Alt. 3,43 metros) é classificada como uma estação Climatológica Principal do tipo convencional. Esta estação é operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sob responsabilidade do 3° Distrito de Meteorologia (3° DISME do INMET). O posto pluviométrico de Guamaré é operado pela EMPARN.

Os dados de ventos que corresponderam aos períodos simulados, chuvoso e seco, são descritos a seguir.

Para efeito deste estudo e de acordo com a disponibilidade de dados, o período representativo da estação chuvosa (Figura 4.4), o qual inclui os meses de maio, junho e julho, a mediana da intensidade dos ventos, independentes da direção, é de 4,79 m.s<sup>-1</sup>, com valores mínimo e máximo de 0 m.s<sup>-1</sup> e 11,37 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente. A direção varia, principalmente, entre ventos que vêm do NE, L, SE e S, com predominância de ventos de SE (Figura 4.5).

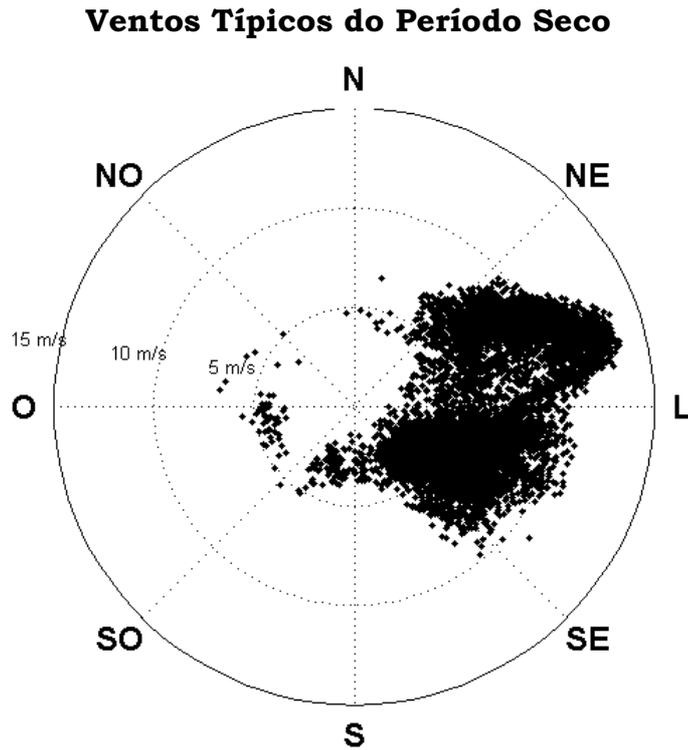


**Figura 4.4.** Diagrama polar dos dados de vento médio usados para a simulação do período chuvoso.

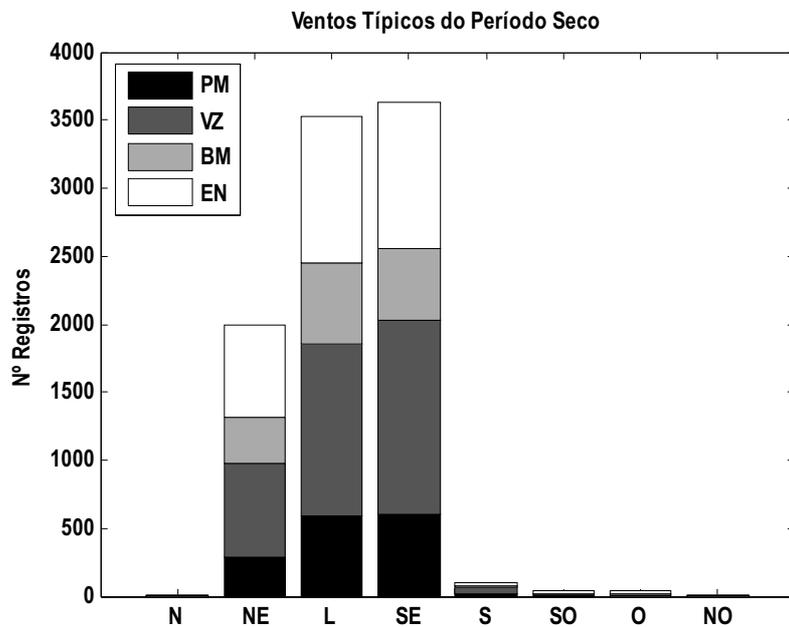


**Figura 4.5.** Gráfico de barras para as direções dos ventos médios típicos do período chuvoso (maio a julho) usados para a simulação.

No que diz respeito ao período representativo da estação seca (Figura 4.6), foram considerados os meses de novembro a janeiro devido à continuidade dos dados disponíveis para estudo. Tais dados de vento mostram intensidades variando entre 1,37 m.s<sup>-1</sup> e 13,68 m.s<sup>-1</sup>, com mediana de 6,67 m.s<sup>-1</sup>. A predominância da direção dos ventos é de SE e de L (Figura 4.7), seguidos em menor quantidade por ventos de NE.



**Figura 4.6.** Diagrama polar dos dados de vento médio (novembro a janeiro) usados para a simulação do período seco.



**Figura 4.7.** Gráfico de barras para as direções dos ventos médios típicos do período seco (novembro a janeiro) usados para a simulação.

#### 4.5.4. Forçante astronômica (marés)

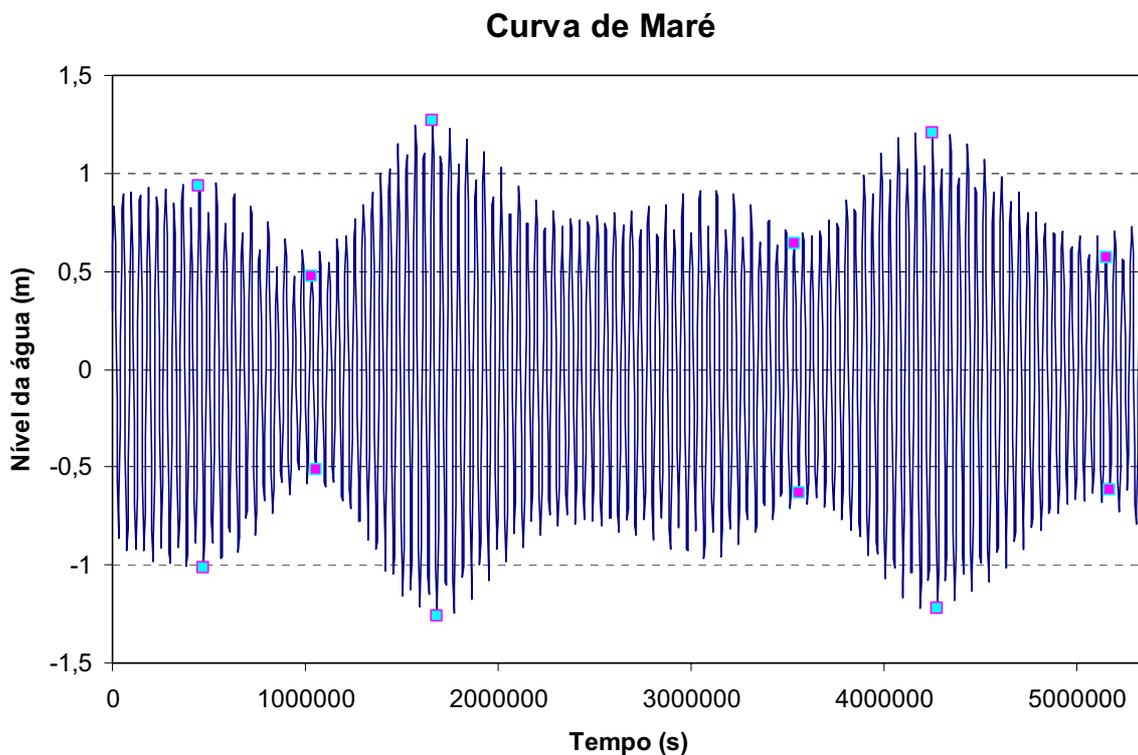
A malha utilizada por todos os cenários deste estudo considerou como fronteiras abertas os limites leste, norte e oeste do domínio. Nestes limites foi sugerida uma maré semi-diurna a partir das constantes harmônicas (Tabela 4.1) obtidas para a estação no Porto de Guamaré no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2005).

**Tabela 4.1.** Características das oscilações do nível do mar utilizadas como condição de contorno para as simulações na RCG - RN. Fonte: FEMAR (2005).

Componente	Período (seg.)	Amplitude (m)	Fase (rad)
M2	44714,1644	0,8730	2,5133
S2	43200,0000	0,2520	3,0020
N2	45570,0537	0,1430	2,2166
K2	43082,0452	0,0680	3,0369
O1	92949,6300	0,0450	3,4907
Mm	2380713,1375	0,0140	0,1745
MSf	1275721,3880	0,0180	4,4680
K1	86164,0908	0,0450	4,1015
M4	22357,0822	0,0250	2,7576
T2	43259,2171	0,0150	2,9845
P1	86637,2046	0,0150	4,0492
MTM	789085,3904	0,0140	0,1396
MNS2	42430,0714	0,0420	3,7699
NU2	45453,6159	0,0270	2,2515

Esta estação maregráfica está localizada na foz do Rio Aratuá (no pier de atracação da cidade), na latitude 05°06'18,0" S e longitude

36°19'06,0" W. No caso, trata-se de uma maré semi-diurna, onde é estabelecido um Nível Médio ( $Z_0$ ) de 134 cm acima do NR (Nível de Redução), com médias de preamares de sizígia (MHWS) de 246 cm acima do NR, média das preamares de quadratura (MHWN) de 196 cm acima do NR, média das baixa-mares de sizígia (MLWS) de 21 cm acima do NR e média das baixa-mares de quadratura (MLWN) de 62 cm acima do NR. A curva de maré para todo o período de simulação está representada na Figura 4.8.



**Figura 4.8.** Curva de maré, obtida através das constantes harmônicas do Porto de Guamaré, exibindo as marés de sizígia (S - quadrado azul) e quadratura (Q - quadrado rosa) utilizadas para análise durante toda a simulação (62 dias).

#### 4.5.5. Condições iniciais

As condições iniciais ( $t = t_0$ ) definidas para todos os nós modelados do modelo hidrodinâmico são as componentes do vetor velocidade 2DH,  $U$

e  $V$  (na direção  $X$  e  $Y$ , respectivamente), e a elevação na superfície livre ( $\zeta$ ). Para o módulo 3D, as condições iniciais são geradas automaticamente de acordo com os valores acima, a velocidade do vento e a rugosidade equivalente do fundo.

Sendo assim, as simulações dos três cenários foram realizadas com velocidades horizontais começando do zero, denominada de “partida a frio”, e com elevação inicial da superfície livre ( $\zeta$ ) de 1,6391 m, correspondendo ao estágio de maré enchente.

Na Tabela 4.2 são exibidas as opções de modelagem consideradas nas simulações.

**Tabela 4.2.** Opções de modelagem consideradas nas simulações da RCG.

Modelo FIST3D	Estima a circulação hidrodinâmica tridimensional (equações de <i>Navier-Stokes_3D</i> para fluido incompressível com pressão hidrostática)
Período de simulação	5.356.800 seg. (62 dias)
Passo de tempo ( $\Delta t$ )	60 seg.
Número <i>Courant</i> médio	3,0
Níveis verticais	21
Fechamento turbulência	Calculada internamente

#### 4.5.6. Condições de contorno horizontais

Para a circulação hidrodinâmica, é preciso que sejam estabelecidas as condições de contorno para os campos de velocidade e elevação da superfície livre da água. Tal artifício é usado como forma de transmitir ao modelo informações sobre o que ocorre fora do domínio modelado. Quando

o modelo 3D é utilizado, devem ser considerados os contornos horizontais e verticais.

Os contornos abertos e os contornos de terra são os dois tipos de contornos horizontais. Os contornos abertos representam os limites do domínio de modelagem e, geralmente, a imposição da elevação da superfície livre é a principal forçante para estes contornos. Os contornos de terra representam as margens e seções de rios ou canais que estejam no domínio, sendo as vazões ou velocidades dos rios geralmente prescritas.

Os contornos verticais, considerados para o módulo 3D, são as condições de contorno na superfície e no fundo, ou seja, a tensão do vento e a imposição de velocidade nula, respectivamente.

Durante este estudo, todos os dados utilizados foram submetidos a um processo de pré-tratamento com o propósito de melhor adequação aos arquivos de dados de entrada para o modelo.

As condições de contorno utilizadas no SisBaHiA foram definidas e testadas com a intenção de representar situações características da área. As forçantes astronômicas foram traduzidas pelas forças de gravidade induzidas pela ação da maré.

As características das oscilações do nível do mar utilizadas para as simulações na RCG como condição de contorno são apresentadas na Tabela 4.3 a seguir.

**Tabela 4.3.** Tratamento das condições de contorno consideradas nas simulações da RCG.

Superfície	Cisalhamento eólico	Variável e uniforme com intervalo de 10 minutos entre as leituras
Fundo	Rugosidade média ( $\varepsilon$ )	0,04 m (mín. = 0,03 m e máx. = 0,16 m)
	Batimetria	PETROBRAS (2006a) e IDEMA (2004b)
Fronteiras	Aberta	Contorno oceânico (leste, norte e oeste)
	Fechada	Contorno de terra
Estuários Guamaré e Galinhos	Vazão afluente	Calculada internamente pelo modelo
Constantes harmônicas	Fonte: FEMAR (2005)	

#### 4.5.7. Cenários de simulação

Com o propósito de caracterizar a circulação hidrodinâmica da Região Costeira de Guamaré/RN, baseando-se na sazonalidade dos ventos nesta região, foram configurados três cenários para simulação que se resumem ao:

**Cenário 1** – simulação hidrodinâmica sem considerar a forçante eólica, apenas a forçante astronômica (marés de sizígia e quadratura);

**Cenário 2** – simulação hidrodinâmica considerando a forçante astronômica (marés de sizígia e quadratura) e a forçante eólica com ventos médios típicos do período chuvoso;

**Cenário 3** – simulação hidrodinâmica considerando a forçante astronômica (marés de sizígia e quadratura) e a forçante eólica com ventos médios típicos do período seco.

Os mapas temáticos horizontais foram elaborados utilizando-se o método *Kriging*. Nestes casos foram previamente realizadas interpolações manuais visando garantir a fidelidade das distribuições espaciais geradas pelos algoritmos de interpolação.

#### **4.6. APLICAÇÃO DO MODELO LAGRANGEANO**

O modelo Lagrangeano foi aplicado aos cenários descritos na seção 4.5.7 acima. Com o propósito de simular a situação potencialmente mais crítica do ponto de vista de impactos ambientais à RCG, as simulações ocorreram a partir da baixa-mar da segunda maré de sizígia do modelo hidrodinâmico.

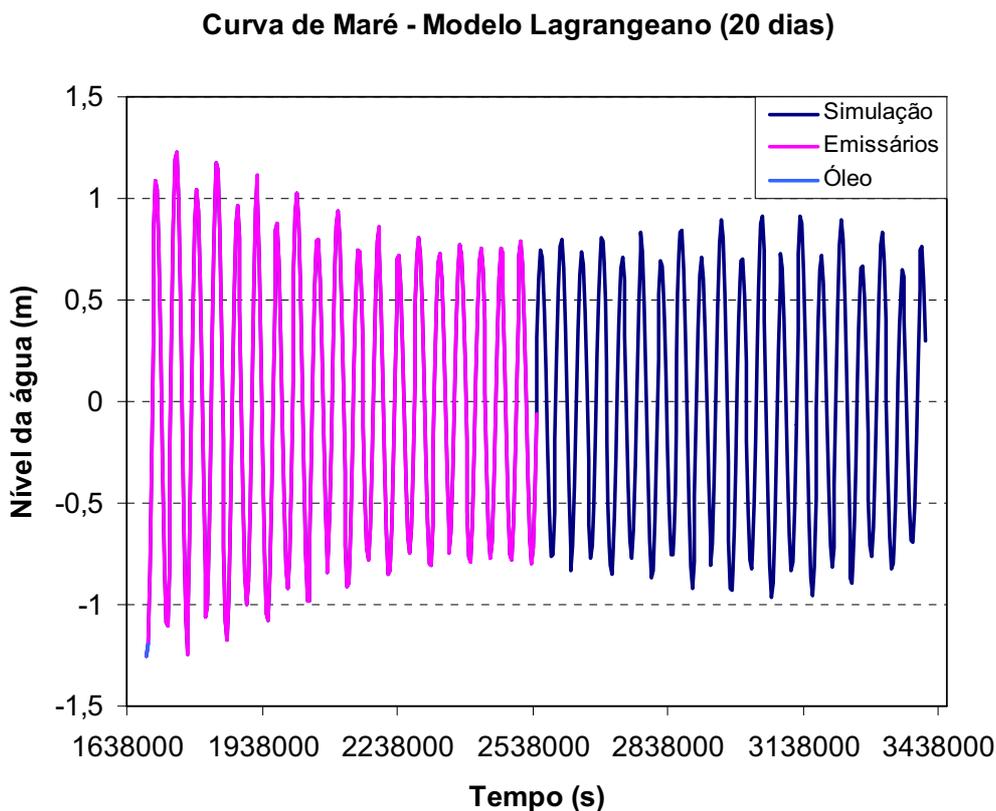
Dois cenários Lagrangeanos foram estabelecidos (ver Figura 3.1). São eles:

**Cenário 4** – simulação do lançamento contínuo de efluentes através de dois emissários situados na Plataforma Continental a oeste do domínio modelado;

**Cenário 5** – simulação de um vazamento de óleo próximo ao Porto de Guamaré, à jusante do rio Aratuá.

Foram, assim, simulados três cenários hidrodinâmicos para cada um destes cenários Lagrangeanos, resultando em um total de seis simulações (Cenários 4.1, 4.2, 4.3 e 5.1, 5.2, 5.3).

O período de simulação considerado foi de 20 dias (1.728.000 s), o qual teve início no instante correspondente à baixa-mar da segunda maré de sizígia (1.681.200 s), instante esse que a fonte inicia o lançamento das partículas, com passo de tempo de 100 segundos. A curva de maré referente ao tempo total de simulação Lagrangeana está representada na Figura 4.9 a seguir. A opção por iniciar as simulações na baixa-mar foi definida procurando-se evidenciar a situação mais crítica no que se refere ao eventual transporte de poluente para a costa.



**Figura 4.9.** Curva de maré dos 20 dias de simulação do modelo Lagrangeano (Emissários e Vazamento de óleo).

Em ambos os cenários, as condições de contorno aberto ocorrem quando uma partícula atravessa um seguimento de contorno e é perdida. Já para o contorno de terra ocorre a situação padrão, onde a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem perder massa.

Nenhum tipo específico de óleo ou de efluentes de emissário foi levado em conta e, assim, reações de produção, consumo e mudanças de estado foram consideradas inexistentes nos casos modelados.

É importante ressaltar que as simulações lagrangeanas apresentadas visam apenas exemplificar a influência dos ventos numa pluma de contaminantes e não o estudo de circulação e transporte destes. Portanto, as simplificações aplicadas aqui tornam-se aceitáveis.

#### **4.6.1. Emissários**

Devido à presença de dutos e emissários no pólo petrolífero de Guamaré, dois emissários foram considerados nas três simulações do Cenário 4. O emissário mais distante (E1) foi situado nas coordenadas 9.444.364,19 N e 789.216,07 E (tamanho do difusor: 12 m x 12 m), cuja vazão considerada é de  $1,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Rcentrium, 2007). O mais próximo da costa (E2) foi localizado nas coordenadas 9.442.242,61 N e 789.392,54 E (tamanho do conjunto de difusores: 200 m x 200 m), com vazão de  $0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Rcentrium, 2007).

O tipo de escoamento para os dados hidrodinâmicos foi 2DH, por ocupar toda a coluna d'água, enquanto, o modo de transporte das partículas foi determinado como advectivo e difusivo. O lançamento contínuo destas partículas nas duas fontes do tipo retangular teve duração de 10 dias (864.000 s). Foram lançadas 5 partículas por emissário a cada passo de tempo totalizando 86.400 partículas durante toda a simulação.

#### **4.6.2. Vazamento de óleo**

Para as três simulações referentes ao Cenário 5, a fonte considerada foi estabelecida próxima ao Porto de Guamaré nas coordenadas 9.434.999,00 N e 797.360,50 E, tendo esta o tamanho de 20 m x 20 m e vazão de  $0,00028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Esta área foi escolhida devido ao tráfego constante de embarcações e, portanto, à potencialidade de ocorrer um vazamento na mesma.

O tipo de escoamento para os dados hidrodinâmicos foi 3D, nível 1 da coluna d'água (aproximadamente 0,66 m abaixo da superfície), o qual é recomendado para o caso em que a pluma contaminante ocupa apenas uma camada com espessura menor que a coluna d'água (COPPE, 2004).

O modo de transporte estabelecido foi o advectivo e o difusivo. Em seguida, foi considerada a espessura de 0,90 metros da pluma de óleo, uma vez que esta não ocupa toda a coluna d'água.

Um vazamento de 1 m<sup>3</sup> durante 1 hora na fonte do tipo elíptica foi estimado. O decaimento de primeira ordem das partículas foi definido para 12 horas (43.200 s), tempo para que ocorra um decaimento de 90% das partículas. Foram, assim, lançadas 50 partículas a cada passo de tempo totalizando 1.800 partículas durante toda a simulação.

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados apresentados são divididos em duas seções principais: modelo Hidrodinâmico Euleriano e modelo Lagrangeano.

Na primeira seção, são exibidos os resultados do modelo hidrodinâmico, os quais são divididos em duas partes. A primeira parte é baseada na análise intrasazonal dos campos residuais (ação eólica e da maré subtraída da ação exclusiva da maré) de cada cenário de forçante eólica (períodos chuvoso e seco). Isto é, serão analisados os campos residuais dos quatro estágios de maré, nos três níveis da coluna de água das marés de sizígia e de quadratura para cada um destes dois períodos. A segunda parte apresenta uma análise intersazonal dos campos residuais, ou seja, serão apresentados os resultados das simulações para os quatro estágios de maré, nos três níveis da coluna de água dos dois períodos (chuvoso e seco), de acordo com cada forçante astronômica (sizígia e quadratura).

Numa segunda seção serão apresentados os resultados da aplicação do modelo Lagrangeano. Esta também é dividida em duas partes: (a) lançamento de efluentes de dois emissários na Plataforma Continental

interna da Bacia Potiguar e (b) vazamento de óleo no rio Aratuá, em frente ao Ancoradouro/Porto de Guamaré.

## **5.1. MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO**

Os resultados da modelagem hidrodinâmica euleriana foram analisados com base nos quatro estágios de maré (preamar, vazante, baixa-mar e enchente) na superfície, meio e fundo da coluna de água, para as marés de sizígia e de quadratura, considerando cada um dos três cenários descritos na seção 4.5.7.

Inicialmente, foi calculada a média das componentes vetoriais das velocidades horizontais de corrente (U e V), para duas marés de sizígia e duas marés de quadratura consecutivas, para cada um dos três cenários de simulação. Os Anexos A e B trazem exemplos do campo cinemático superficial na Bacia Potiguar obtidos nas simulações. Com o objetivo de isolar o efeito eólico, foram elaboradas cartas de campo cinemático horizontal a partir da diferença vetorial entre os resultados da situação “real” (marés + ação eólica) e a situação forçada exclusivamente pelas marés.

Sendo assim, os resultados destas diferenças, aqui denominados de campos residuais, representam, em primeira aproximação, os efeitos dos ventos (período chuvoso e seco) agindo sobre a circulação costeira na área em estudo.

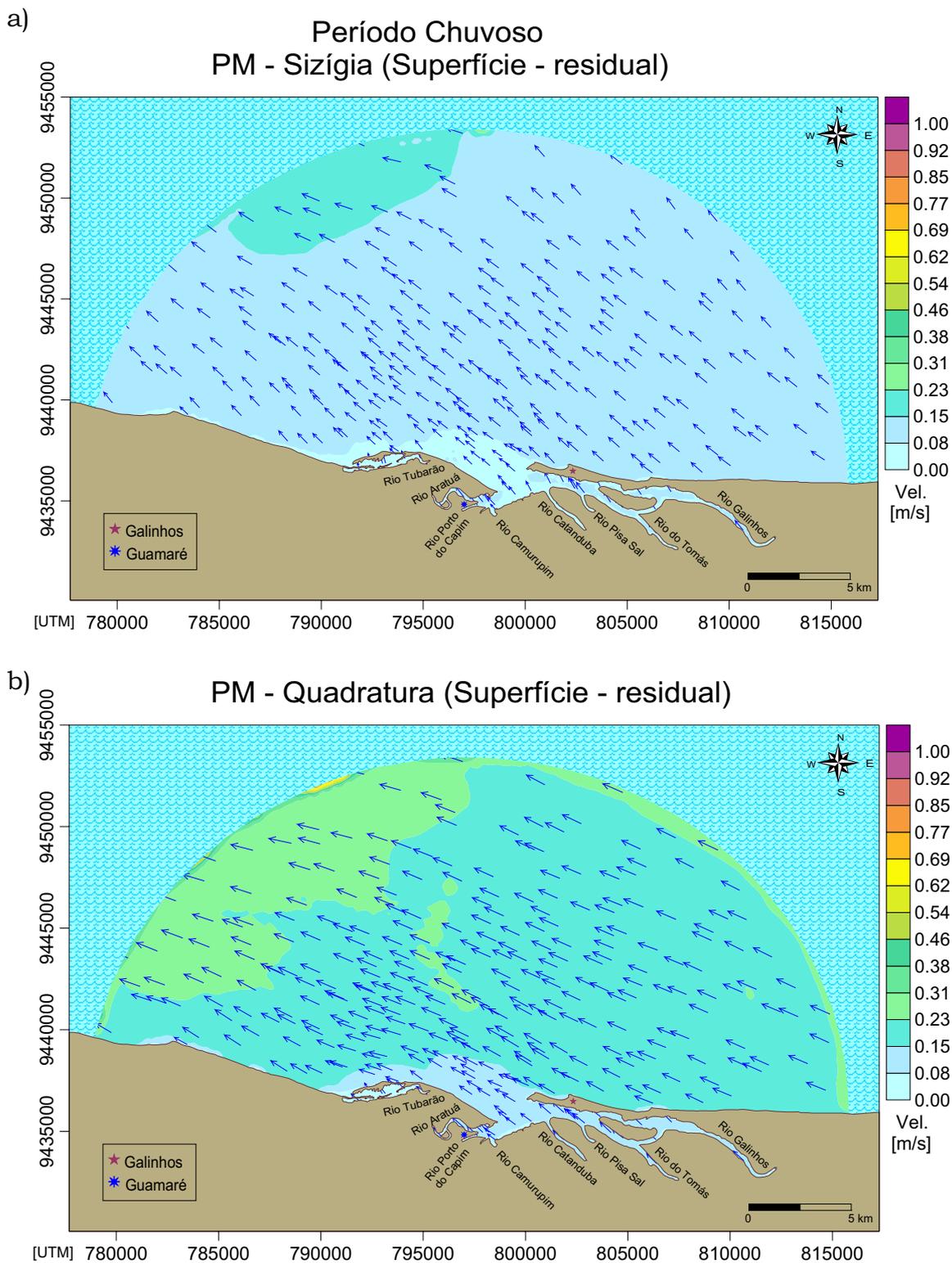
### **5.1.1. Variabilidade intrasazonal - ciclos e estágios de maré**

#### **(a) Período chuvoso (campos residuais) - sizígia x quadratura**

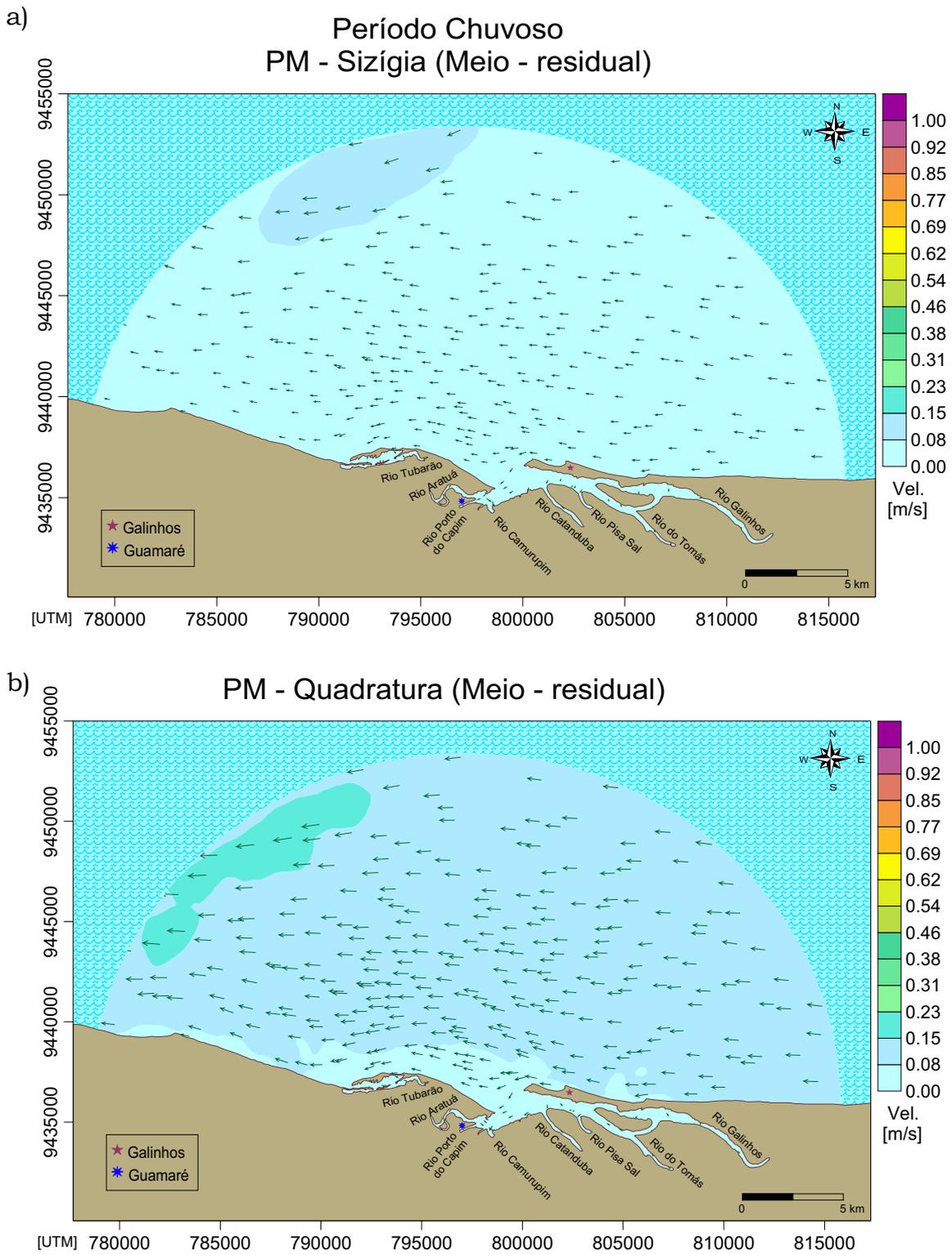
Os campos residuais do período associado à estação chuvosa na Bacia Potiguar, o qual inclui os meses de maio, junho e julho, são representados nas Figuras 5.1 a 5.12.

Durante o estágio da preamar, as correntes superficiais (Figura 5.1) apresentaram-se menos intensas na maré de sizígia, com mediana de 0,12 m.s<sup>-1</sup>, quando comparadas à maré de quadratura (mediana de 0,22 m.s<sup>-1</sup>). A direção destas correntes tem predominância para NO em ambas as marés, com uma tendência para O durante a quadratura.

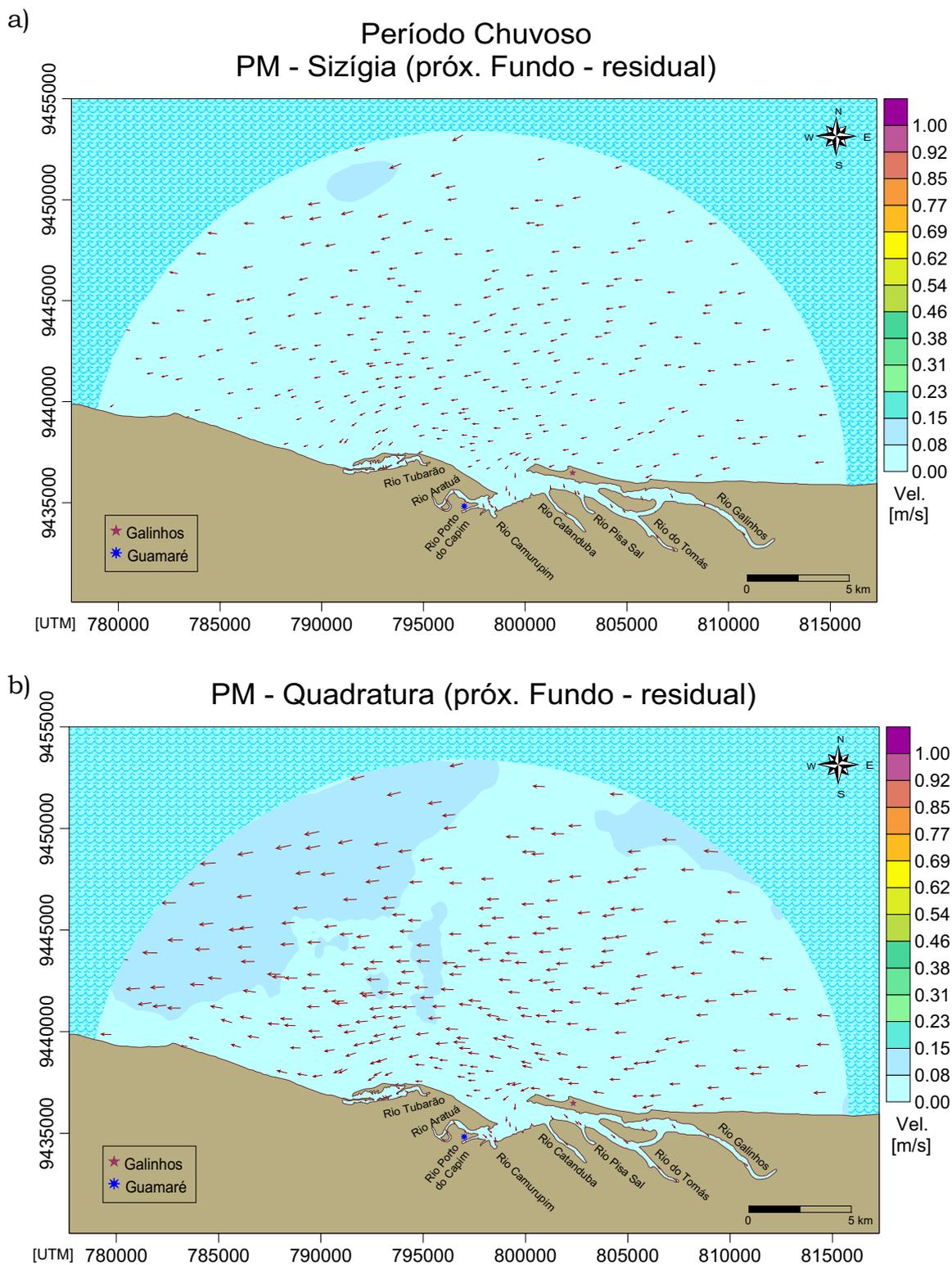
Para as correntes residuais no meio da coluna de água e próximas ao fundo (Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente), as intensidades maiores também são registradas durante a quadratura (medianas de 0,11 e 0,06 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente), mas a direção destas correntes em ambas as marés são para O. Nestes últimos dois níveis da coluna de água, a intensidade e direção das correntes residuais são praticamente as mesmas na área estuarina, ou seja, são baixas e com variadas direções para SO-S-SE.



**Figura 5.1.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.2.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

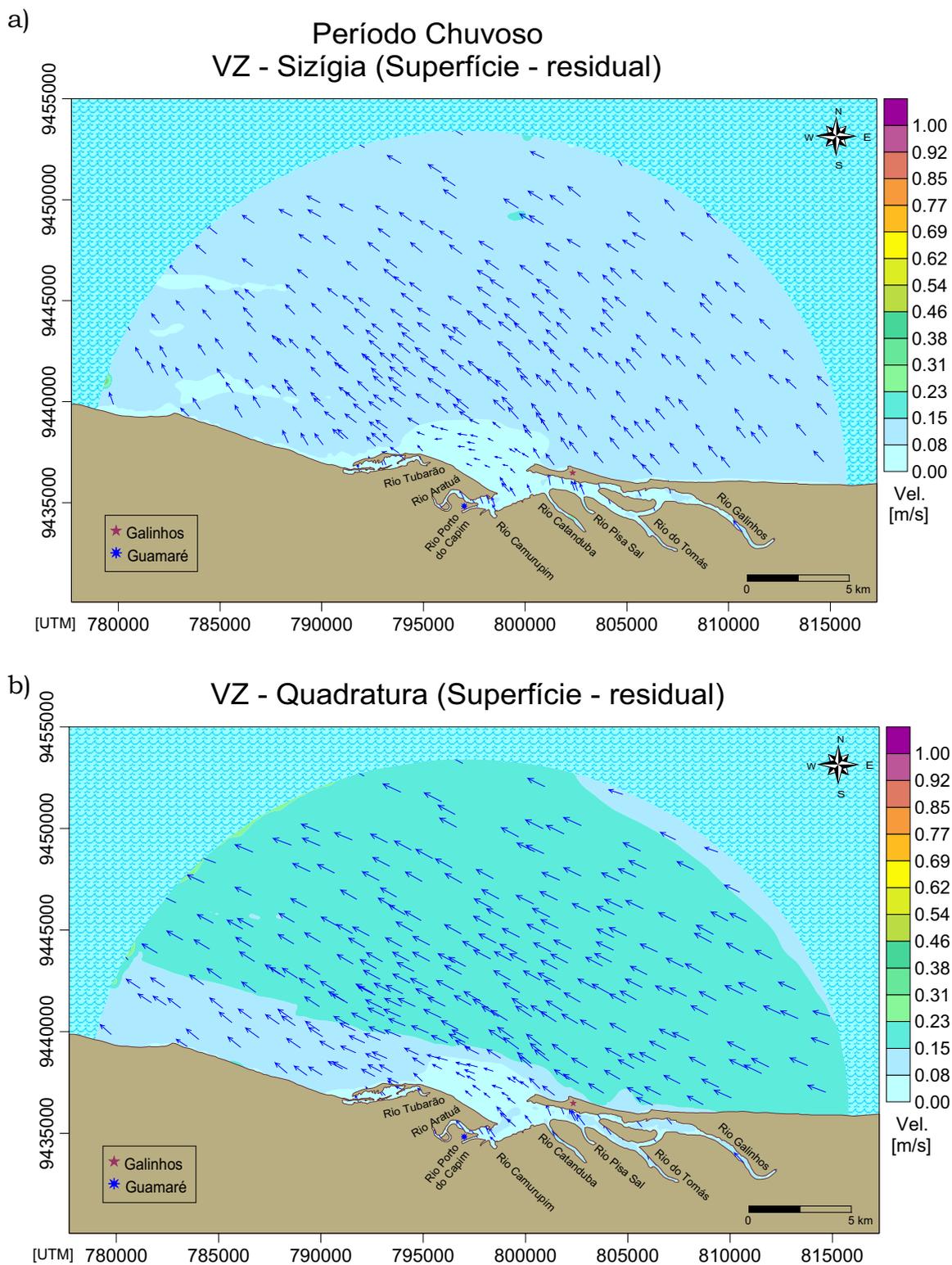


**Figura 5.3.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

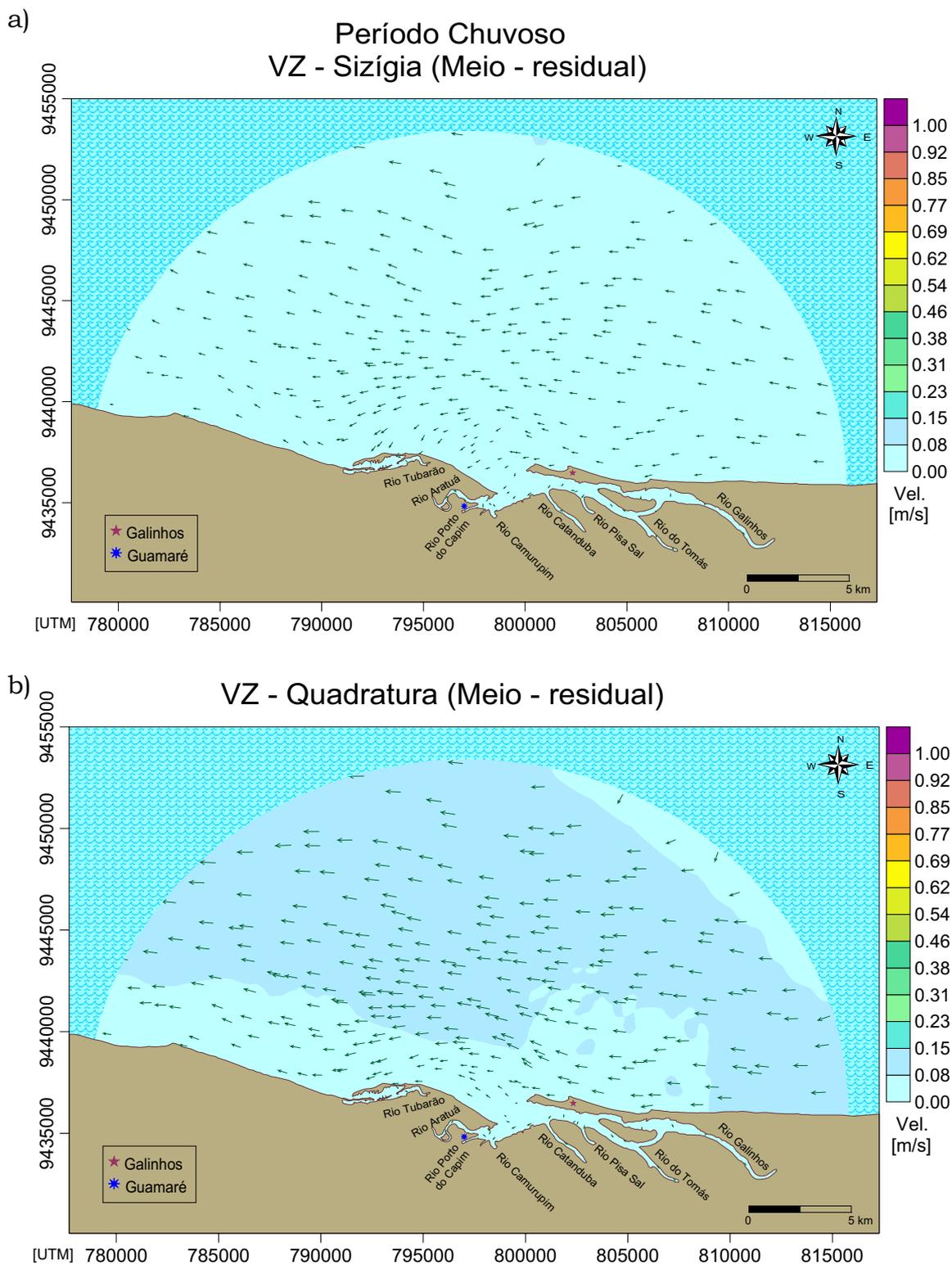
Em comparação à maré de sizígia, o estágio de maré vazante na quadratura apresentou correntes na superfície (Figura 5.4) com maiores velocidades (mediana de  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ ). Apenas em pequenas áreas do domínio modelado, localizadas a nordeste, centro-sul e sudoeste, é que as velocidades residuais se assemelharam nas duas marés. Os vetores destas correntes mostraram direção preponderante para NO em ambas as marés.

No meio da coluna de água (Figura 5.5), as correntes residuais da vazante mostraram intensidades menores durante a maré de sizígia, com mediana de  $0,03 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo praticamente uniformes em todo o domínio. Porém, estas se assemelharam com as correntes residuais da maré de quadratura em quase toda a parte sul da malha (exceto na parte sudeste), inclusive dentro do estuário, e numa pequena área a nordeste do domínio. A direção destas correntes é praticamente a mesma nas duas marés, seguindo predominantemente para O. Já na maré de quadratura, existe um pequeno fluxo residual na direção SO na entrada do complexo estuarino, o que leva a formação de um vórtice neste local e de outro mais próximo ao município de Guamaré.

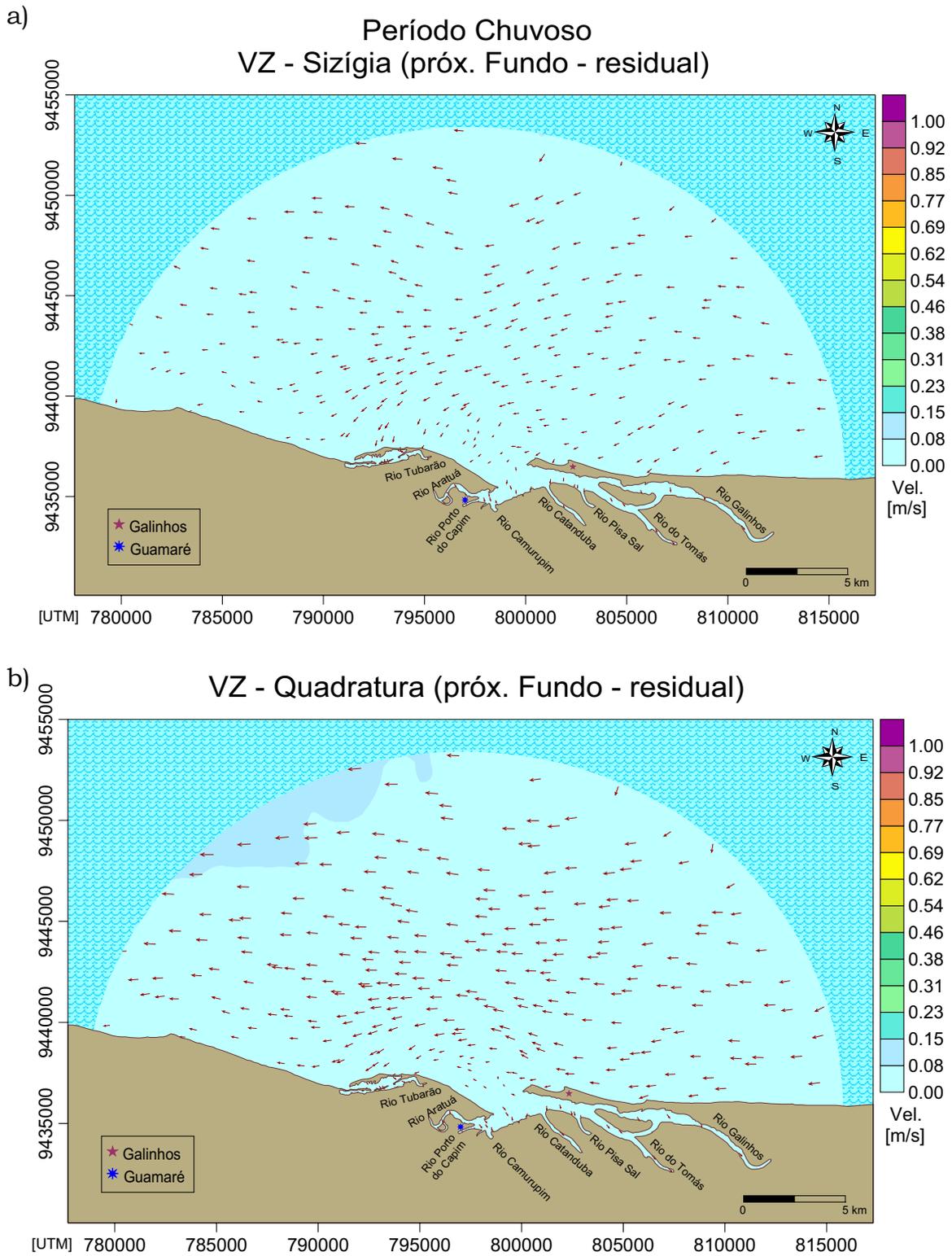
Para as correntes residuais da vazante próximas ao fundo (Figura 5.6), suas intensidades e direções (com predominância para oeste) são semelhantes nas duas marés. Contudo, a intensidade na quadratura é ainda um pouco maior, principalmente na região nordeste do domínio modelado. No centro-sul da malha, ainda na quadratura, há uma área de divergência logo na entrada do estuário que direciona as correntes para o S-SE dentro desta região. Já na maré de sizígia, na região central do domínio (principalmente centro-sul e sudoeste desta região), há um fluxo de correntes para SO que também leva as correntes a se direcionarem para o S-SE dentro do estuário.



**Figura 5.4.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.5.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

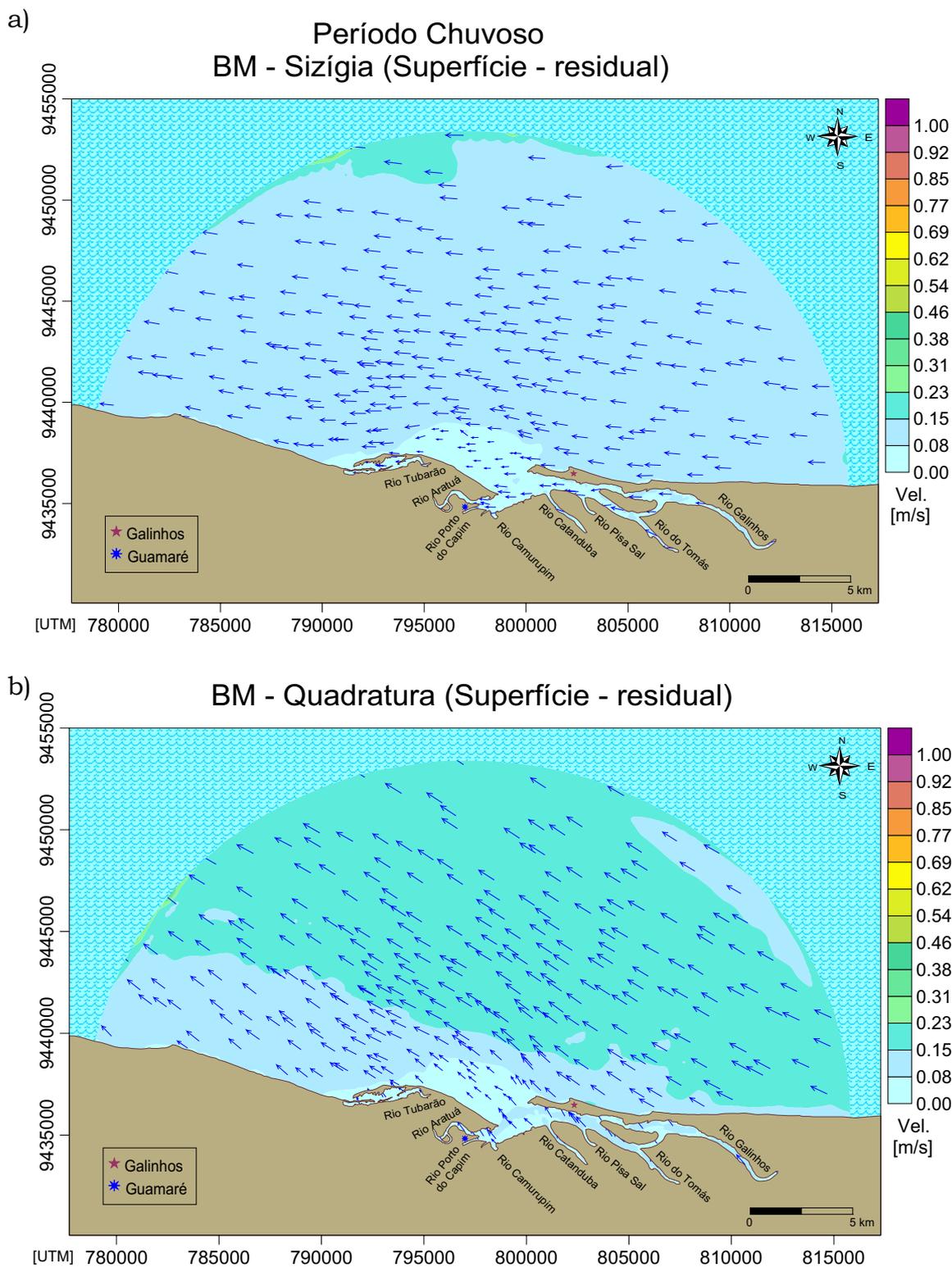


**Figura 5.6.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

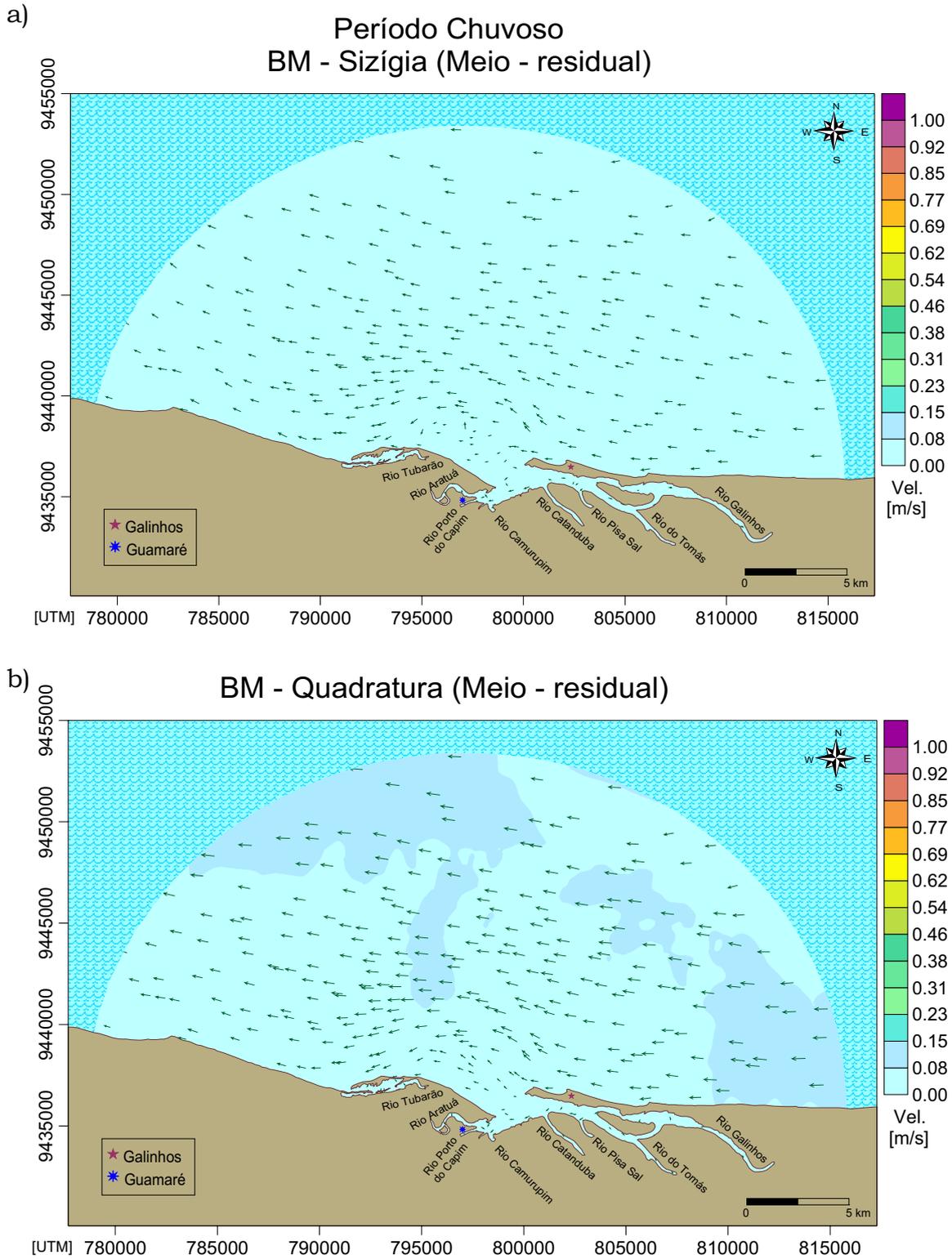
Durante a baixa-mar, as correntes residuais superficiais (Figura 5.7) de sizígia foram menos intensas (mediana de  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ ) quando comparadas com a maré de quadratura (mediana de  $0,16 \text{ m.s}^{-1}$ ), exceto em pequenas áreas ao norte e na parte centro-sul e sudoeste do domínio de integração, onde as intensidades se assemelharam. Contudo, as direções predominantes destas correntes na maré de sizígia foram para O, diferente da maré da quadratura que se direcionaram para NO.

No meio da coluna de água deste estágio (Figura 5.8), as intensidades das correntes residuais se mostraram similares em ambas as marés. No entanto, há certa uniformidade nas intensidades durante a sizígia, enquanto há intensidades um pouco mais altas na quadratura no sentido SE-NO da malha, levando a uma mediana de  $0,07 \text{ m.s}^{-1}$ . O sentido destas correntes tem predominância para O nas duas marés. Na região estuarina, no meio da coluna de água da baixa-mar de ambas as marés, há a formação de dois vórtices, um logo na entrada do estuário e outro mais próximo ao município de Guamaré, direcionando as correntes para o SE, na sizígia, e para S-SO, na quadratura.

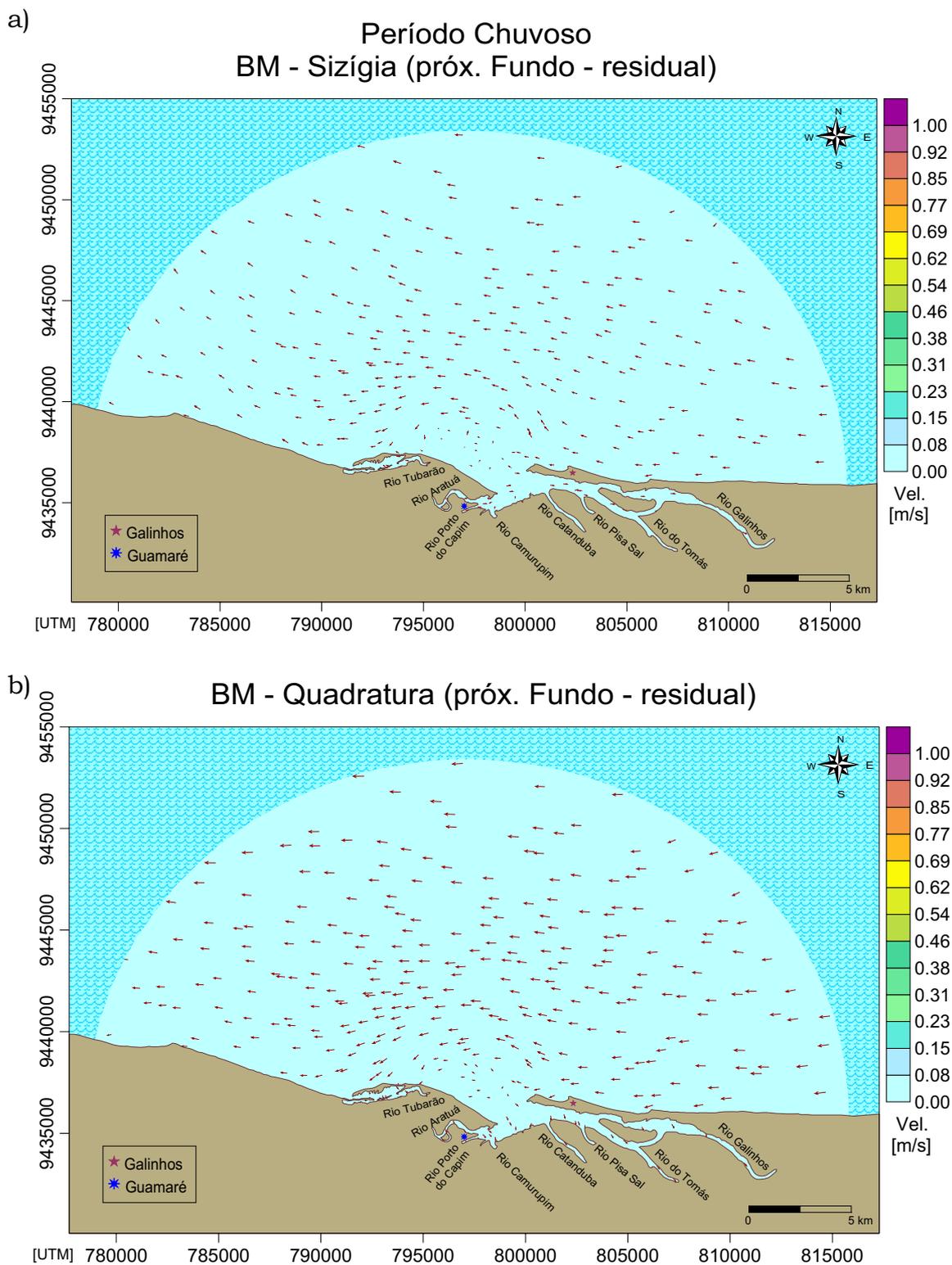
As correntes residuais da baixa-mar próximas ao fundo (Figura 5.9) se apresentaram com intensidades semelhantes nas marés de sizígia e de quadratura, onde, nesta última, os valores foram um pouco mais altos (mediana de  $0,04 \text{ m.s}^{-1}$ ). No entanto, a direção dos vetores esteve praticamente igual nestas duas marés, apontando preferencialmente para O. Próximo à entrada do estuário, na área centro-sul do domínio de integração, os vetores contornaram o banco de areia se deslocando para noroeste, na parte leste, e para sudoeste, na parte oeste desta região durante as duas marés. Dentro do estuário, os vetores residuais apontaram para L-SE, na sizígia, e para S-SE, na quadratura, com intensidades baixas e praticamente iguais.



**Figura 5.7.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.8.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

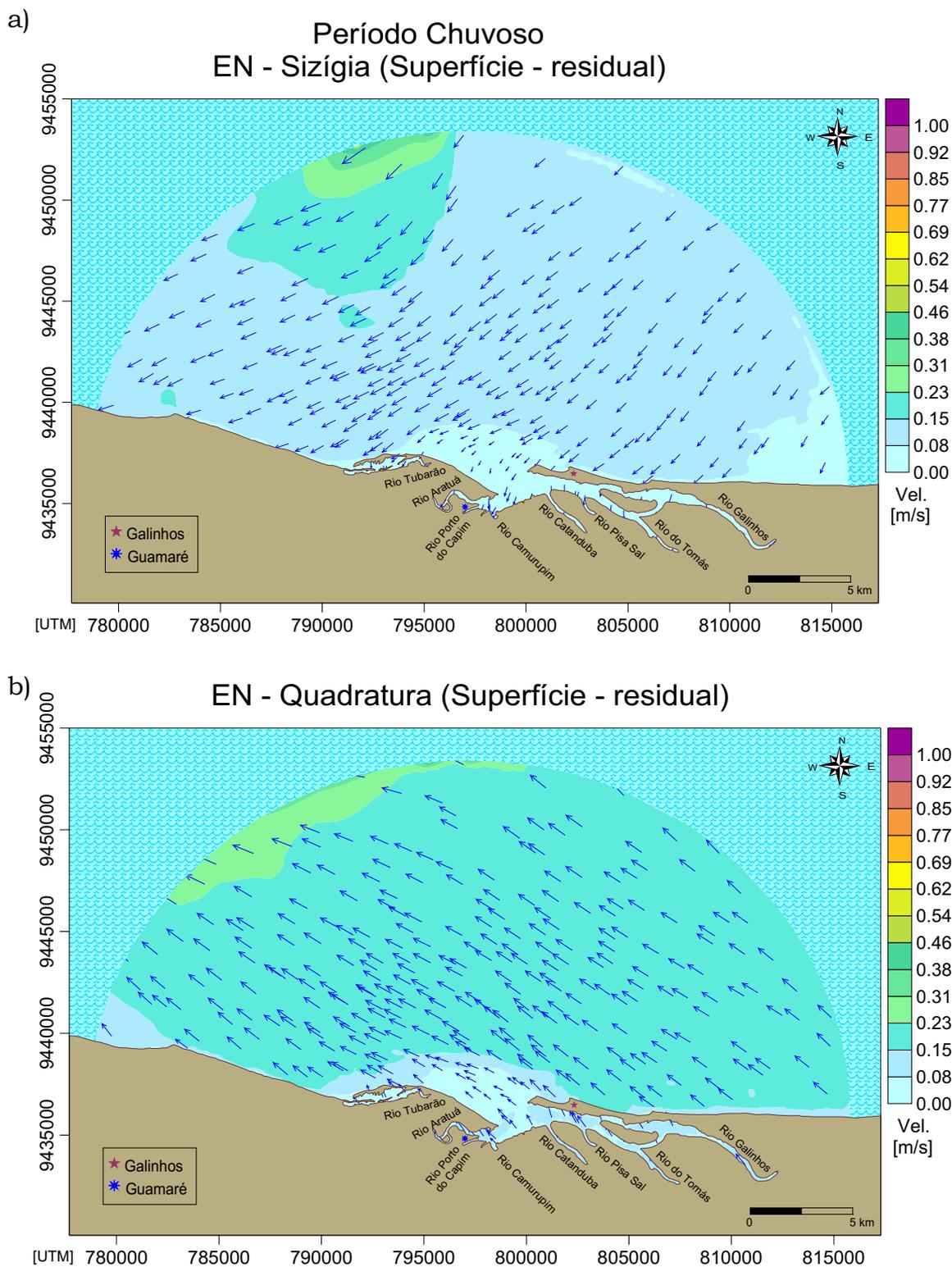


**Figura 5.9.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

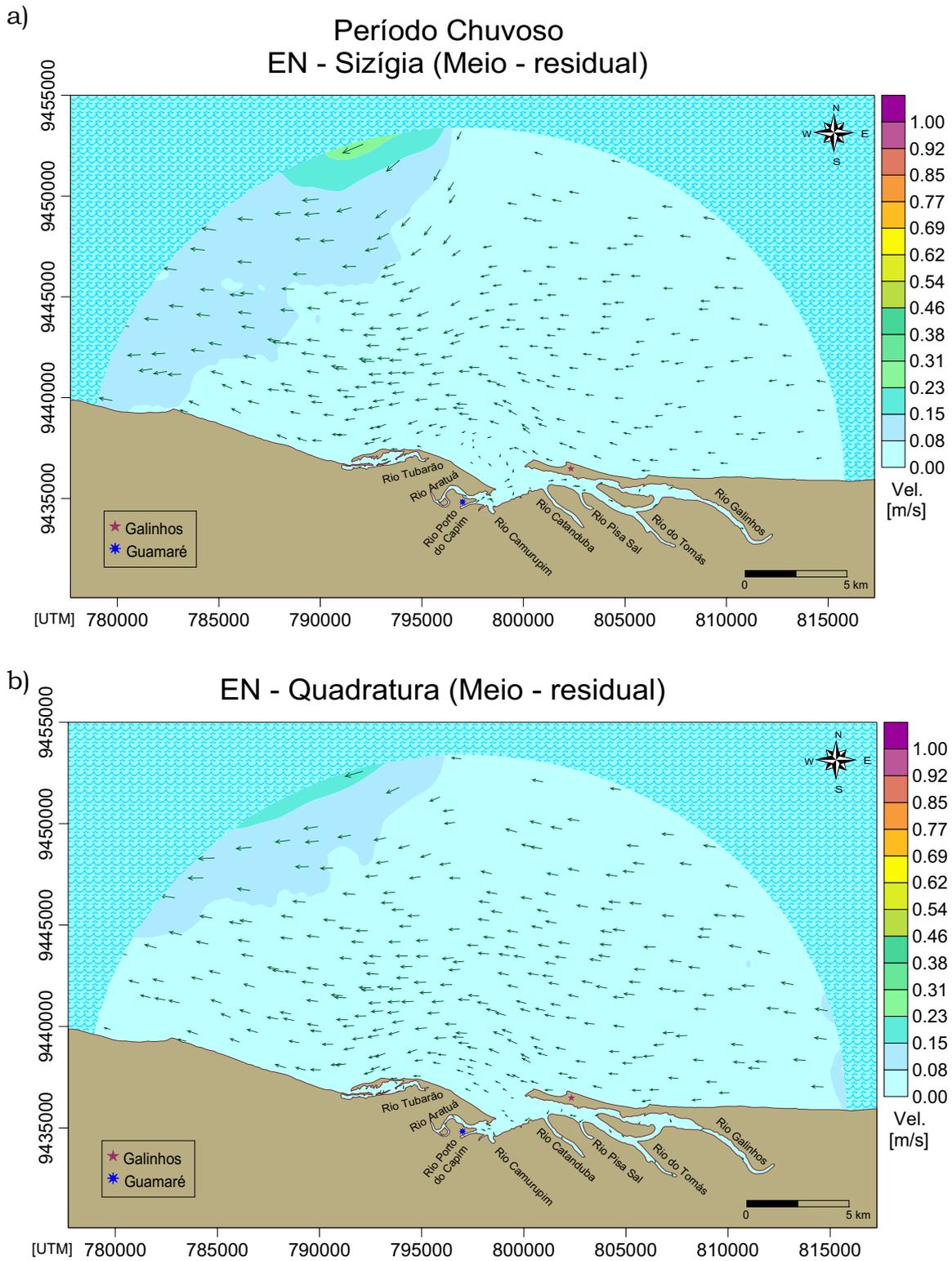
No estágio de maré enchente, as correntes residuais superficiais (Figura 5.10) apresentaram intensidades mais baixas durante a maré de sizígia, com mediana de  $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ . Apenas na parte noroeste do domínio de integração é que estes valores foram mais altos, aproximando-se das intensidades da maré de quadratura (mediana de  $0,18 \text{ m.s}^{-1}$ ). As direções das correntes durante a sizígia predominaram para SO, no entanto, na maré de quadratura estas tenderam para NO.

No meio da coluna d'água (Figura 5.11), durante a enchente da maré de sizígia, as intensidades das correntes residuais foram maiores na parte esquerda da malha, onde os valores mais altos apresentaram-se a noroeste da mesma. Durante a maré de quadratura, os valores medianos de intensidade das correntes foram semelhantes aos da sizígia (com diferença de  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  a menos), de forma geral, sendo as maiores intensidades observadas a noroeste do domínio modelado. Já o fluxo das águas foi direcionado predominantemente para O, tanto na maré de sizígia quanto na de quadratura. Contudo, observam-se vetores de correntes na direção SO, na região noroeste do domínio durante maré de sizígia. Na região estuarina, a direção ocorre mais para o sul (variando entre SE e SO) na maré de quadratura, onde há a formação de um pequeno vórtice próximo ao município de Guamaré. Na maré de sizígia, há um fluxo de correntes entrando nesta região e direcionando-se para L, onde ocorre também a formação de um vórtice próximo à entrada da mesma.

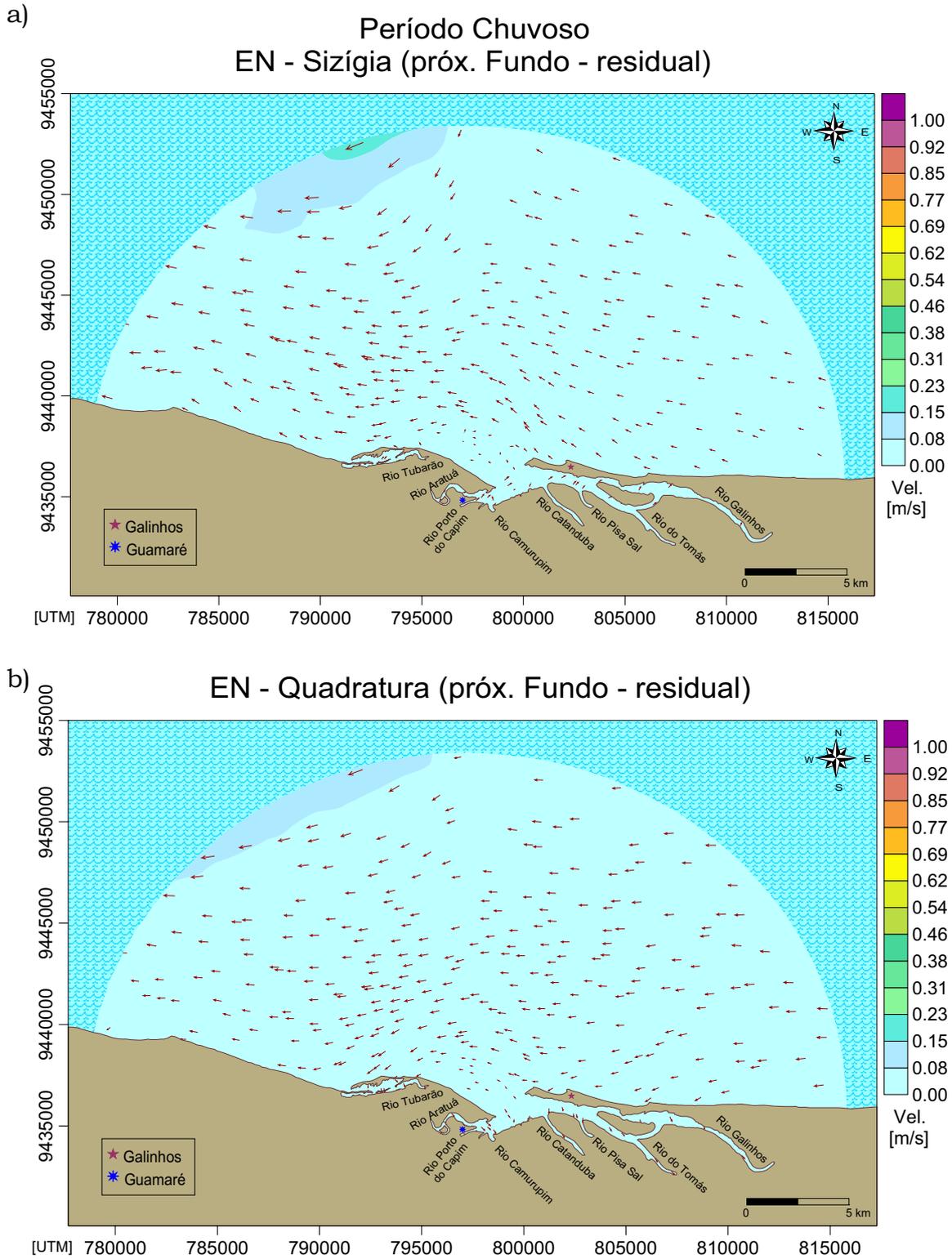
Para as correntes residuais situadas próximas do fundo na maré enchente (Figura 5.12), as intensidades são praticamente as mesmas para as duas marés (diferença das medianas de apenas  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$  a mais na quadratura), ocorrendo um pequeno aumento destas na parte noroeste da malha. Os vetores residuais se direcionam de forma predominante para O, semelhante ao comportamento observado no meio da coluna d'água. Dentro do estuário, o fluxo das águas predomina para a direção NE, na maré de sizígia, e para S-SE, na quadratura.



**Figura 5.10.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso na superfície da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.11.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso no meio da coluna d'água da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.12.** Valores residuais da velocidade das correntes do período chuvoso próximo ao fundo durante a enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

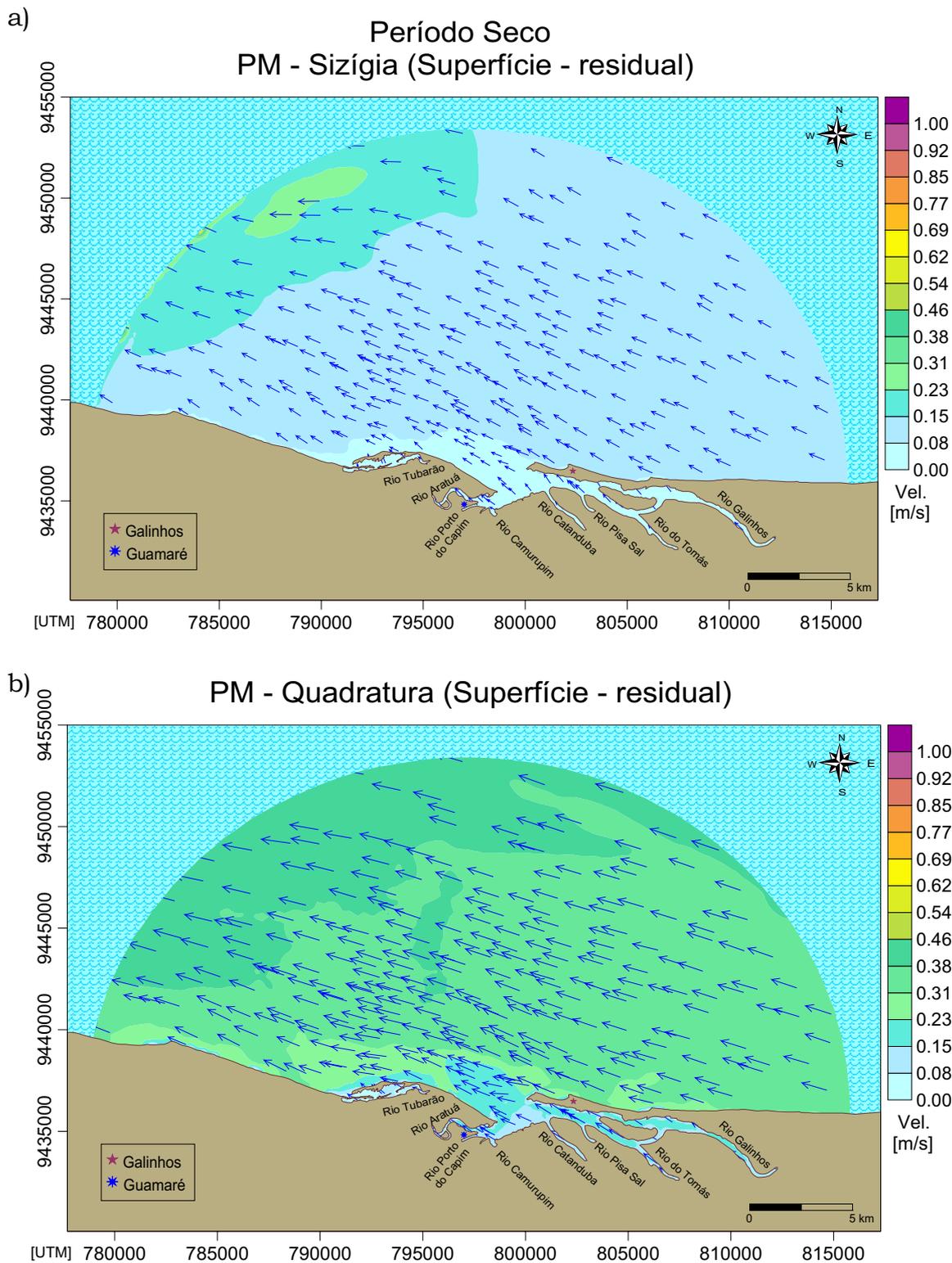
**(b) Período seco (campos residuais) - sizígia x quadratura**

A circulação residual representativa do período seco é exibida nas Figuras 5.13 a 5.24, para as duas marés (sizígia e quadratura).

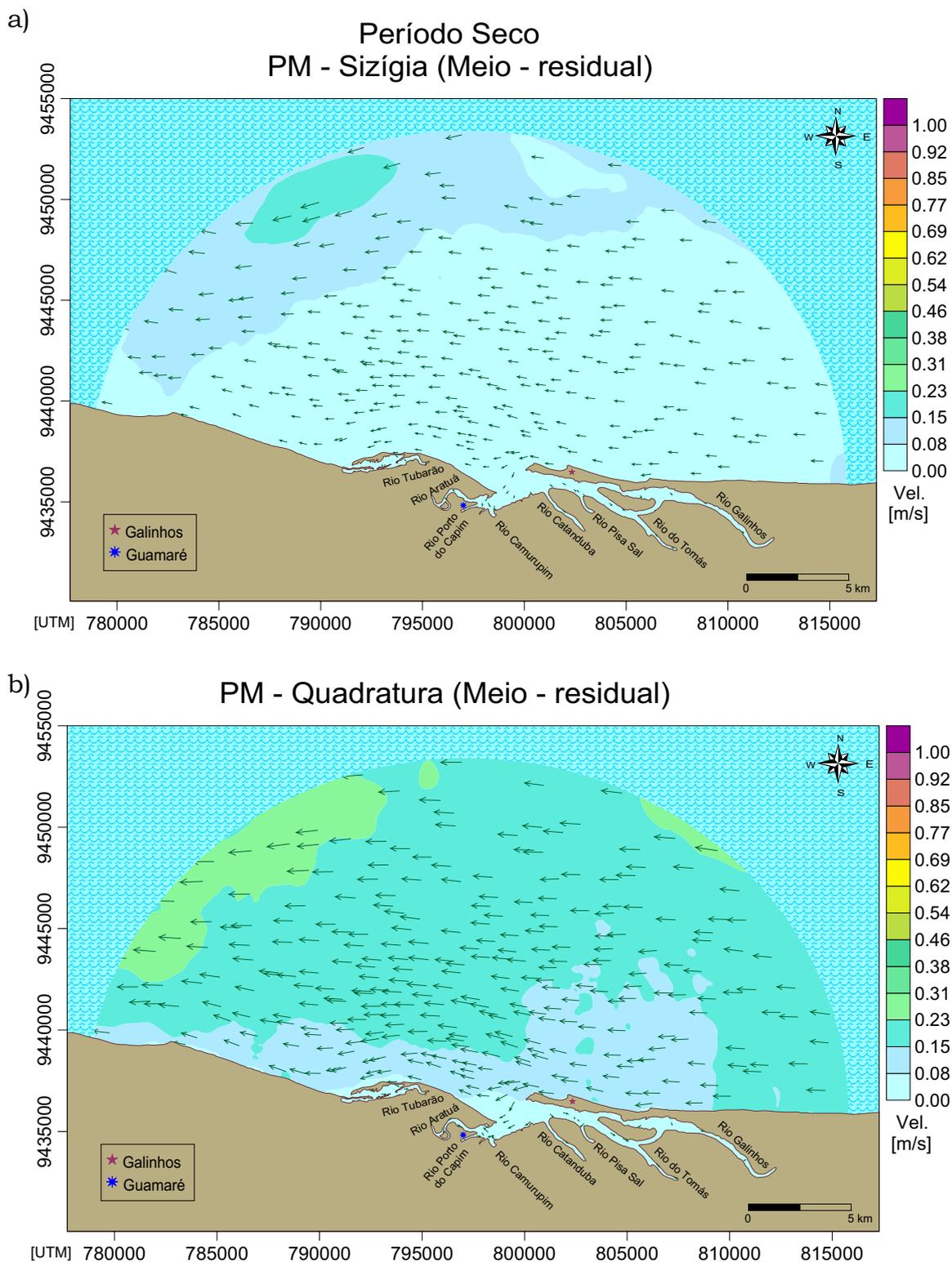
As correntes residuais superficiais da preamar de sizígia (Figura 5.13-a) se direcionaram com predominância para O-NO e mostraram intensidades um pouco variadas (valor da mediana de  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ ) com registros mais elevados na parte noroeste do domínio espacial. Na maré de quadratura (Figura 5.13-b), estas correntes também se dirigiram para O-NO, porém com intensidades maiores (mediana de  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$ ) e mais uniformes quando comparadas aos registros da sizígia.

No meio da coluna d'água da preamar de sizígia (Figura 5.14-a), as maiores velocidades foram observadas ainda a noroeste da malha, contudo, com fluxo predominante para O e valores menores que os da maré de quadratura (Figura 5.14-b). Nesta última, as intensidades tiveram uma mediana de  $0,18 \text{ m.s}^{-1}$  com direção também para O. No estuário, foi possível observar um fluxo de água entrando com intensidade baixa, sendo os maiores valores durante a quadratura, e direcionando-se para SE em ambas as marés no meio e próximo ao fundo.

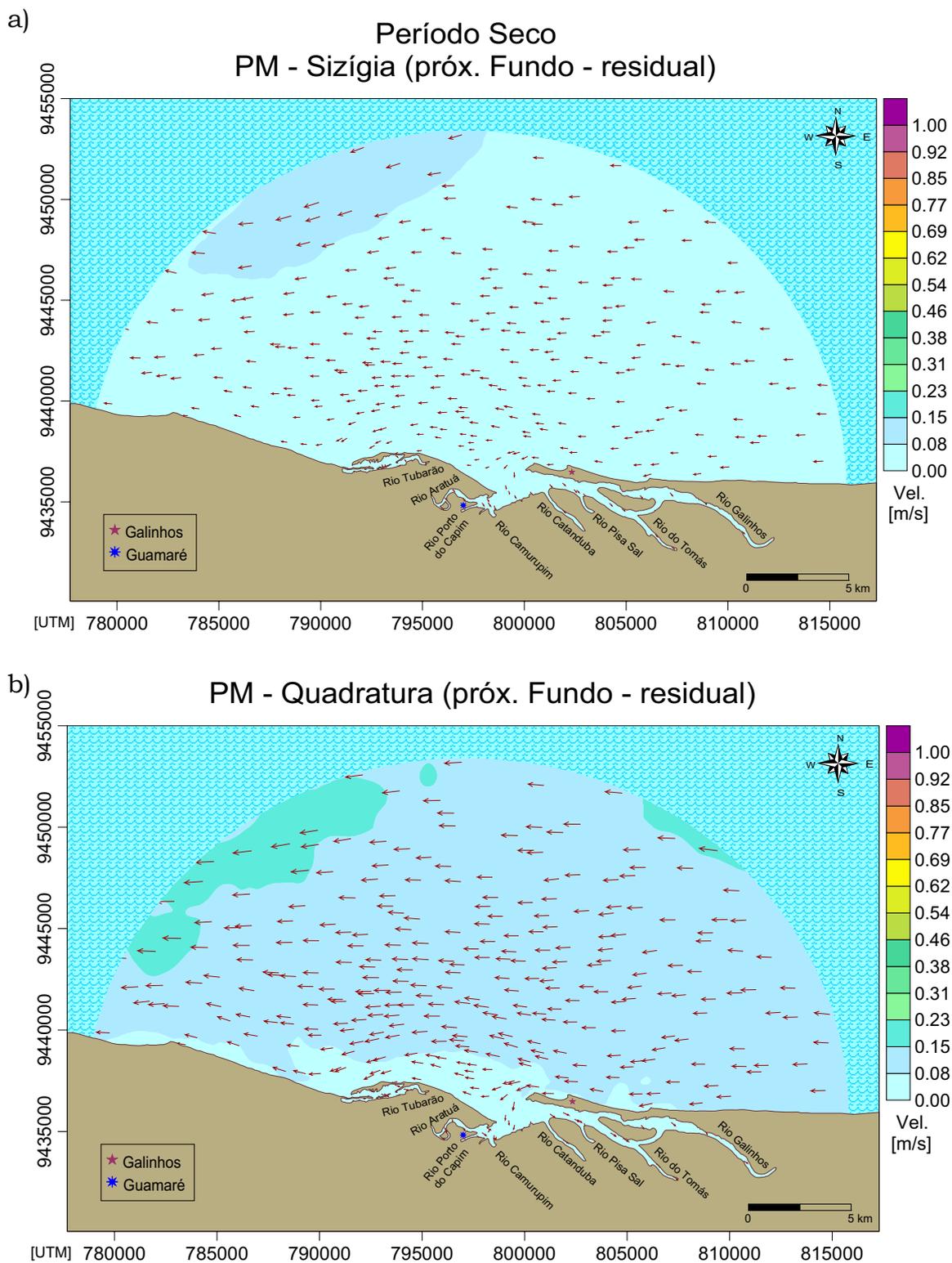
As intensidades das correntes residuais próximas do fundo (Figura 5.15) se apresentaram maiores (mediana de  $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ ) na maré de quadratura. No entanto, os maiores valores permaneceram próximos da fronteira aberta a noroeste da malha e vetores apontando com preferência para O em ambas as marés.



**Figura 5.13.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.14.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d’água da preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

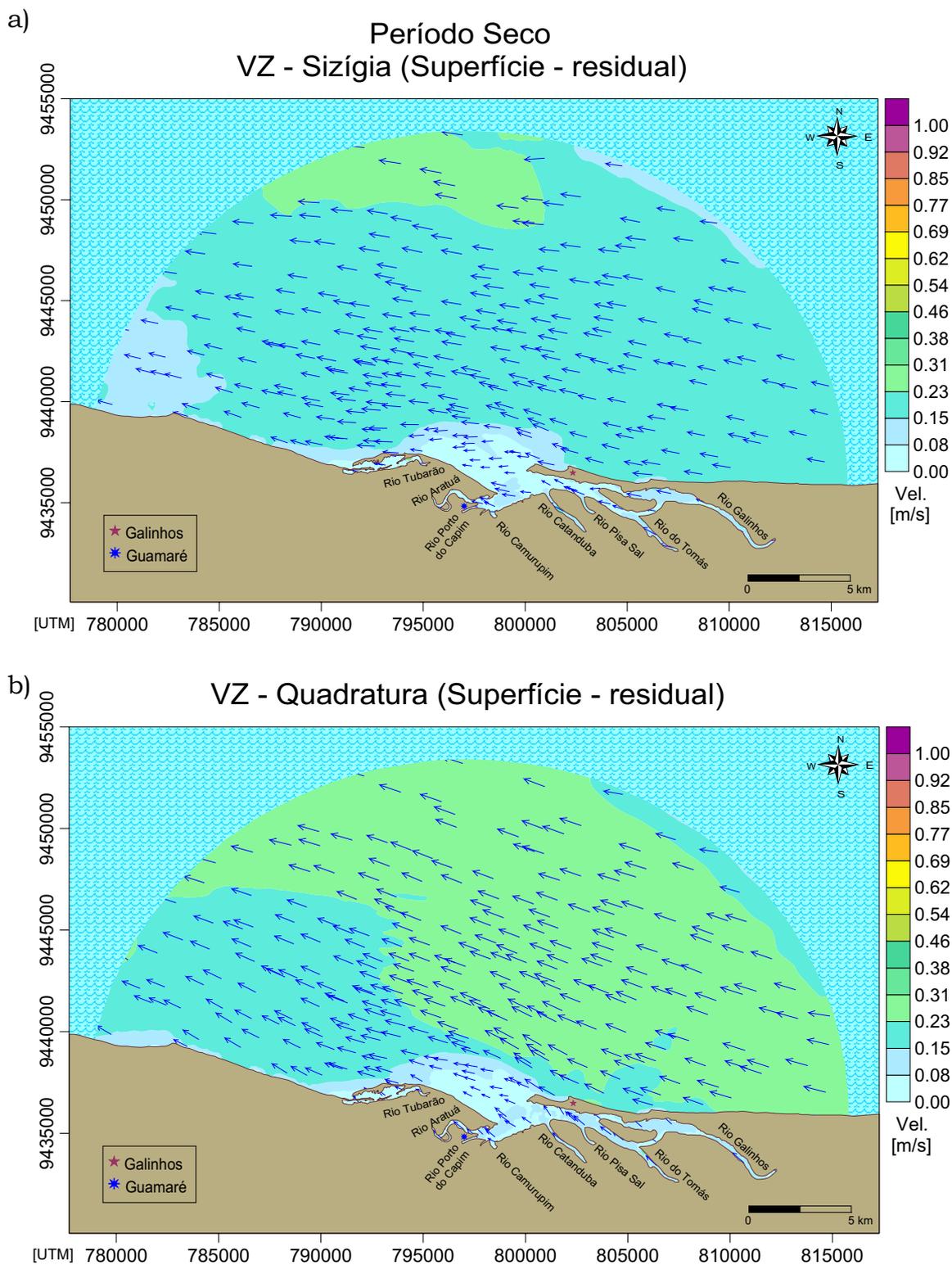


**Figura 5.15.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a preamar de (a) sizígia e (b) quadratura.

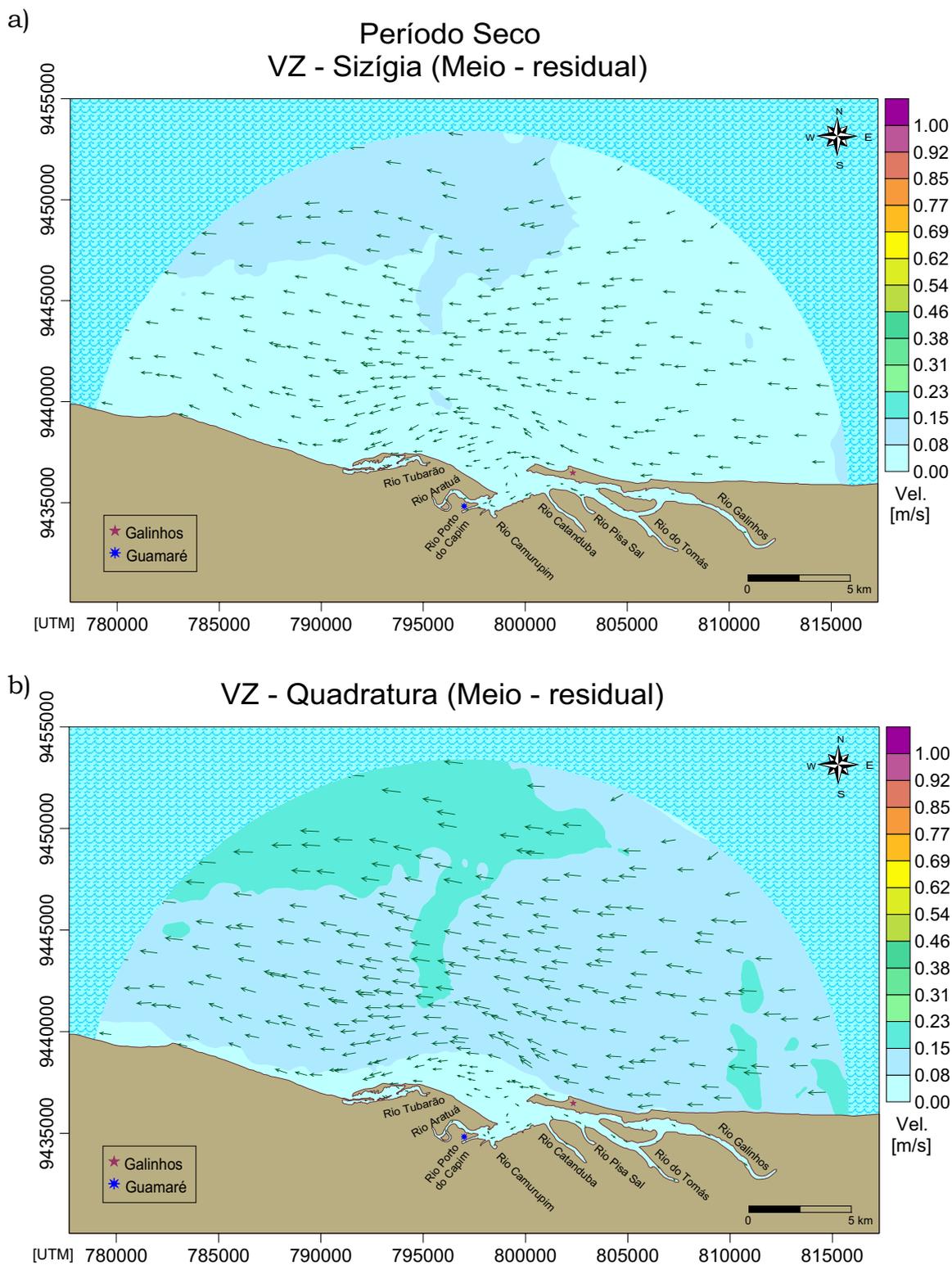
Durante o estágio de maré vazante, as velocidades residuais das correntes na superfície (Figura 5.16) foram maiores na maré de quadratura que apresentou mediana de  $0,23 \text{ m.s}^{-1}$ , enquanto, na sizígia, este valor foi de  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ . A direção predominante das correntes na maré de sizígia foi para O, no entanto, os vetores apontaram preferencialmente para O-NO na maré de quadratura.

Os registros dos dados residuais das correntes no meio da coluna de água (Figura 5.17) apresentaram certa semelhança entre as marés na distribuição das intensidades, onde valores maiores são observados na parte norte e noroeste do domínio. No entanto, os valores mais elevados encontraram-se na maré de quadratura. Quanto aos vetores destas correntes, estes apontaram preferencialmente para O durante as duas marés. Porém, dentro do estuário, pôde ser observada a formação de dois vórtices (logo na entrada deste e próximo ao município de Guamarê) devido a um pequeno afluxo perto de Galinhos, direcionando as correntes para SO-SE, na quadratura, e para SO-NO, na sizígia.

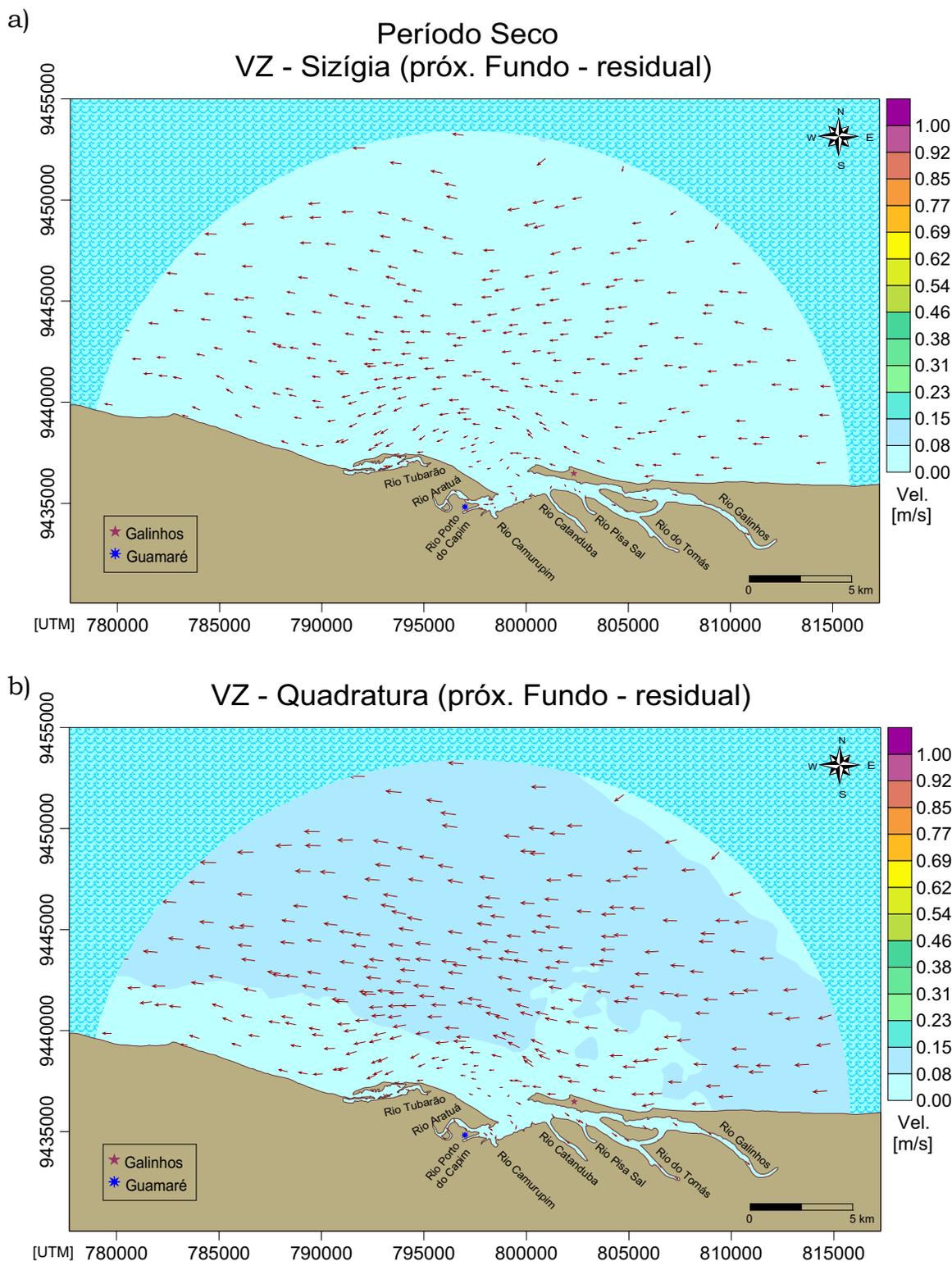
As correntes residuais próximas ao fundo (Figura 5.18) apresentaram intensidades uniformes e mais baixas durante a sizígia, com mediana de  $0,03 \text{ m.s}^{-1}$ , enquanto este valor foi de  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$  na maré de quadratura, ou seja, mais de duas vezes maior que a anterior. No entanto, o sentido dos vetores das correntes foi para O em ambas as marés. Na região estuarina, as intensidades foram ligeiramente maiores na quadratura do que na sizígia, porém, com correntes apontando de forma predominante para SE nas duas marés.



**Figura 5.16.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.17.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d’água da vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

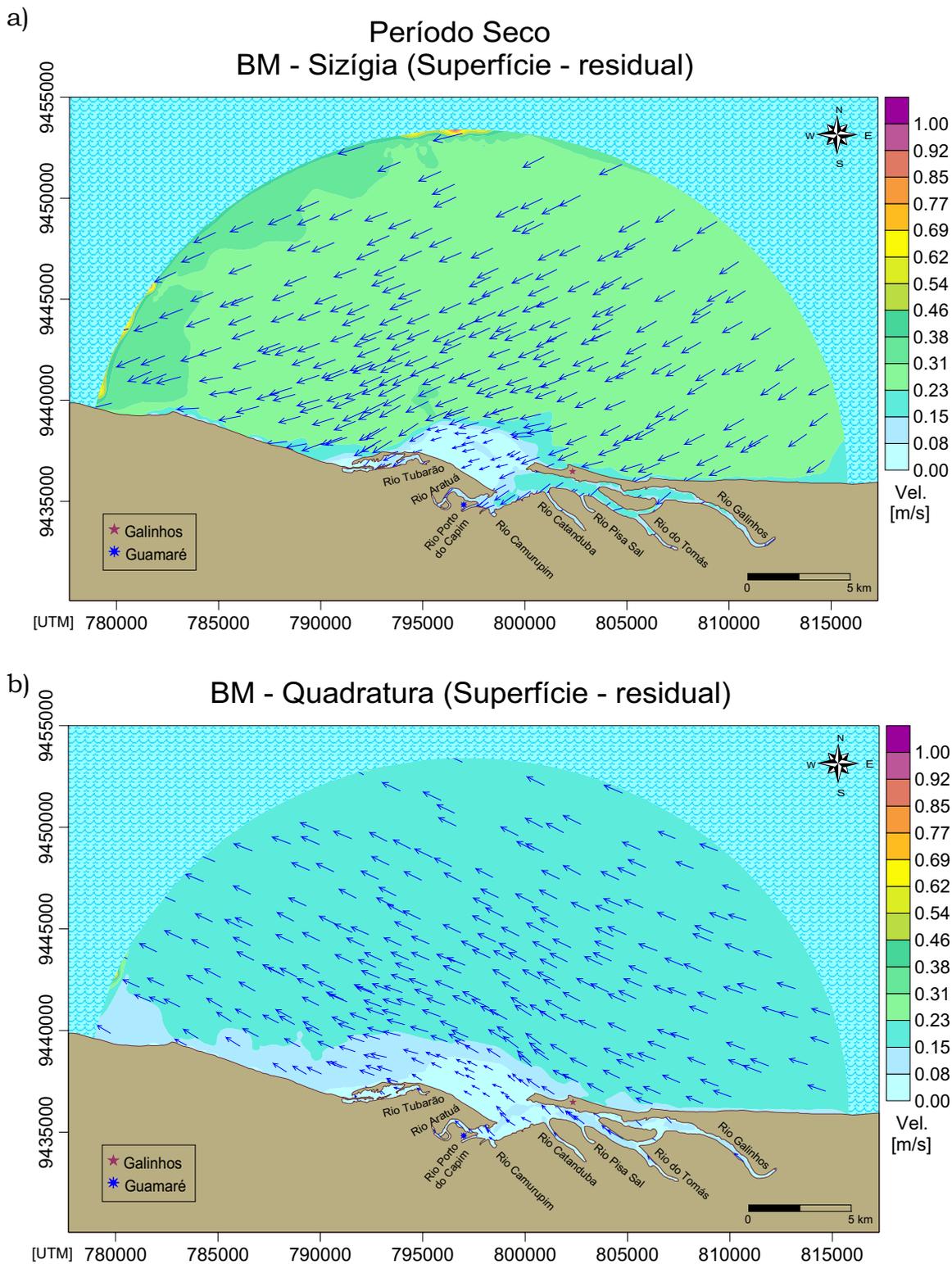


**Figura 5.18.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a vazante de (a) sizígia e (b) quadratura.

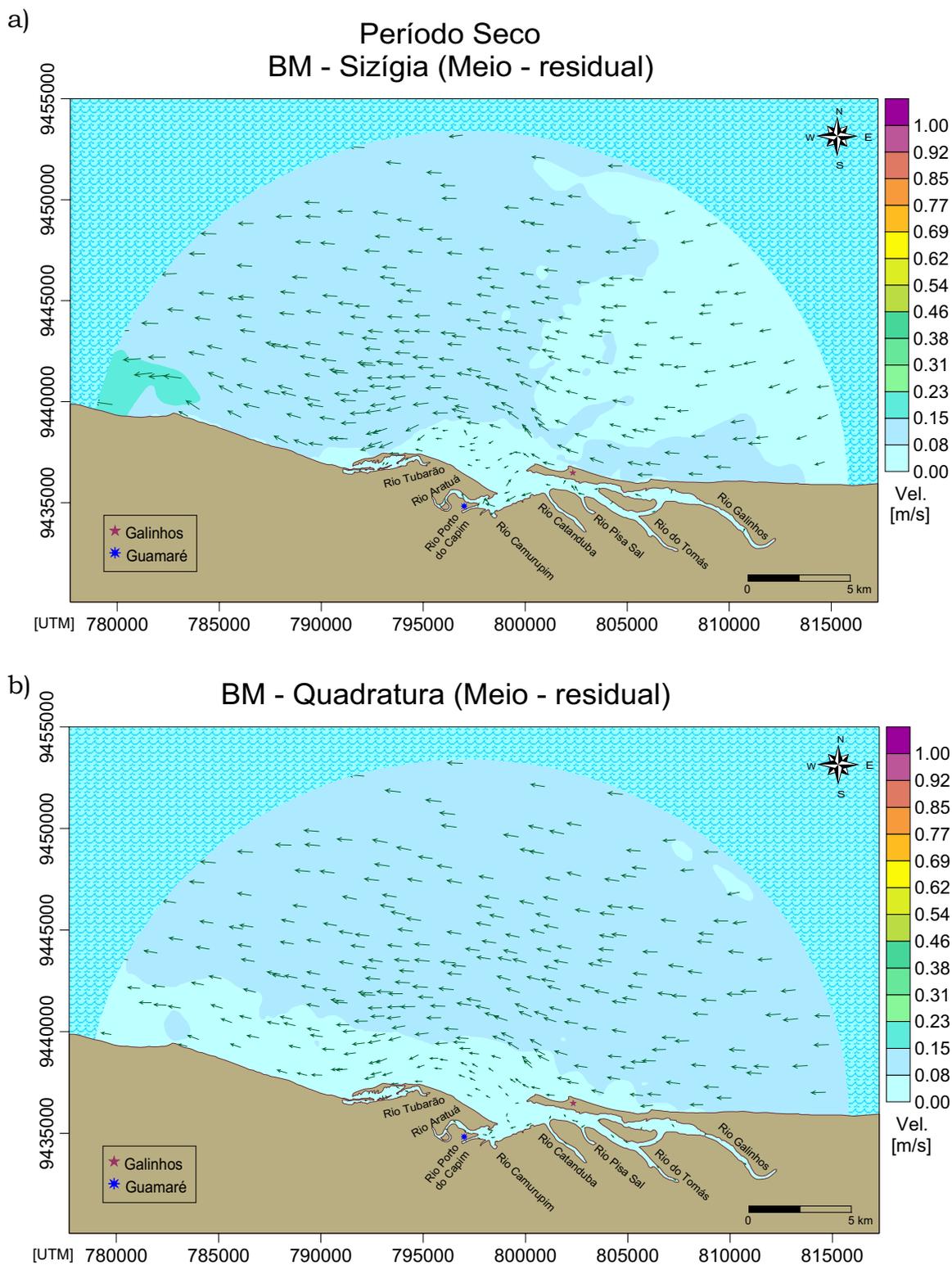
Na Figura 5.19 são exibidos os resultados das correntes residuais superficiais na baixa-mar. Durante a maré de sizígia, as intensidades destas correntes foram mais elevadas do que na maré de quadratura, onde os valores das medianas foram, respectivamente,  $0,28 \text{ m.s}^{-1}$  e  $0,19 \text{ m.s}^{-1}$ . O fluxo destas correntes se diferenciou bastante entre as marés, dirigindo-se para SO-O, na maré de sizígia, e para NO, na maré de quadratura.

Na metade da coluna d'água (Figura 5.20), as intensidades se apresentaram semelhantes em ambas as marés com uma diferença de apenas  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo registrada a maior mediana ( $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ ) na quadratura. No entanto, valores um pouco mais altos foram observados a oeste do domínio modelado da maré de sizígia. A direção predominante dos vetores de corrente residual nesta camada foi para O nas duas marés. Na entrada do estuário, observou-se a formação de dois vórtices (um logo na entrada e outro mais a SO próximo à Guamaré) durante a maré de quadratura fazendo variar o fluxo dentro do estuário para SO-S-SE. Já na maré de sizígia, ocorreu a formação de um único e maior vórtice logo após a entrada do estuário deixando o fluxo um pouco indefinido (variando para SO-NO-NE).

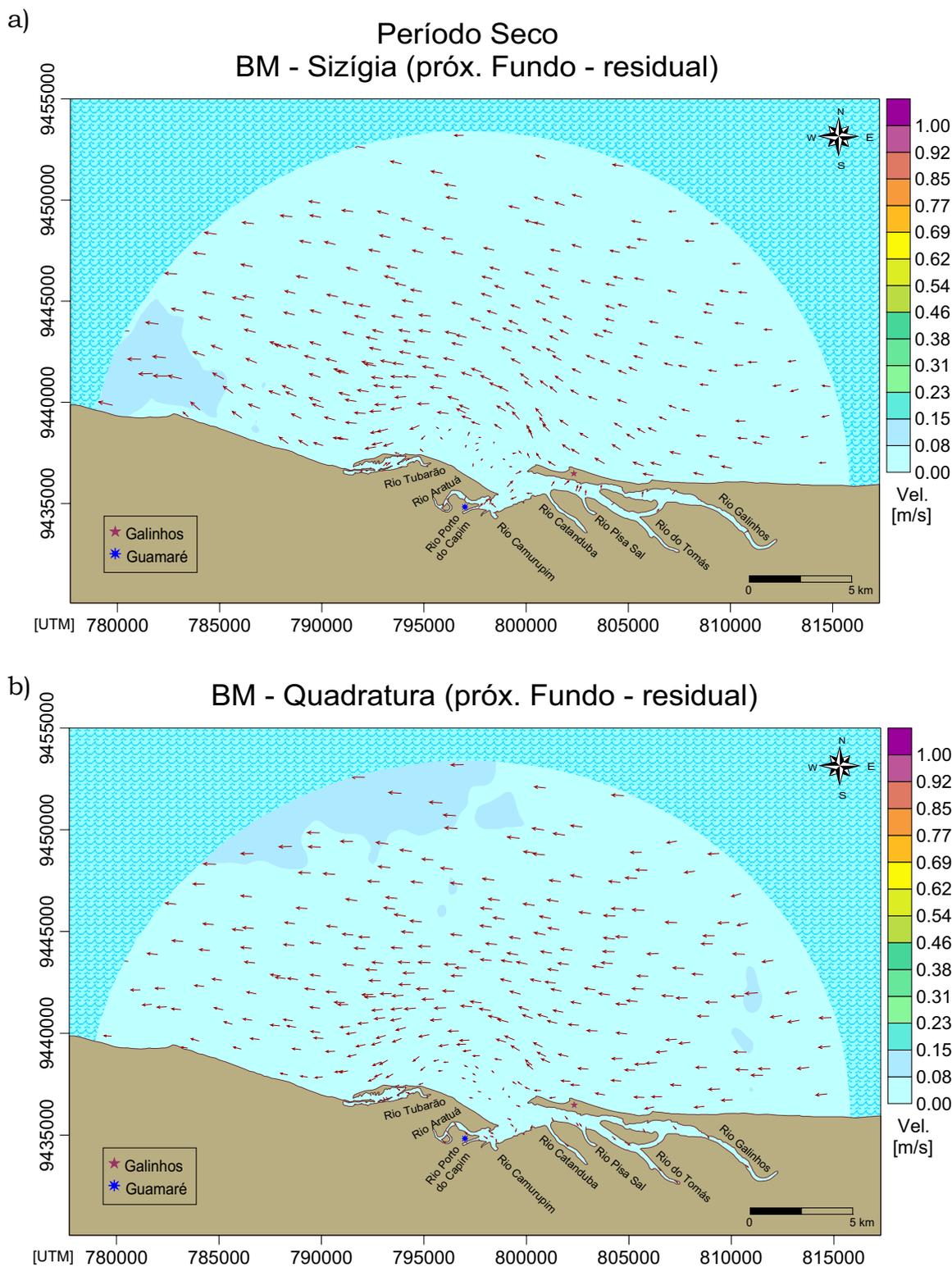
As correntes residuais próximas do fundo (Figura 5.21) na baixa-mar foram bastante similares nas duas marés, onde foram observados dados mais elevados a sudoeste do domínio durante a sizígia, e na região norte-noroeste do mesmo durante a quadratura. No entanto, a mediana da intensidade foi ligeiramente mais elevada na maré de quadratura ( $0,06 \text{ m.s}^{-1}$ ). O sentido destas correntes teve predominância para O, contudo, dentro do estuário este sentido variou para SO-NE, na sizígia, e para SE-SO, na quadratura.



**Figura 5.19.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.20.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d’água da baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

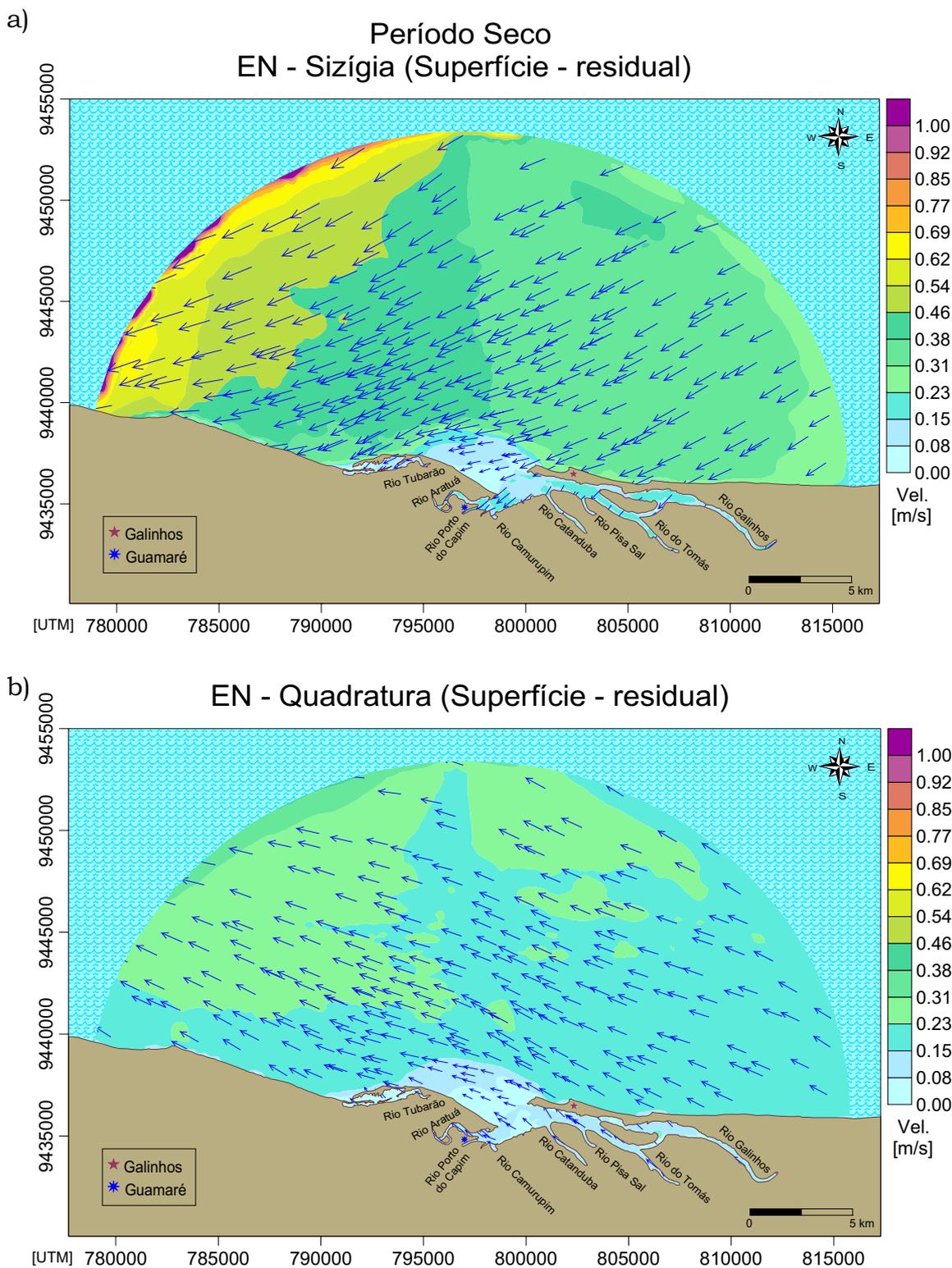


**Figura 5.21.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a baixa-mar de (a) sizígia e (b) quadratura.

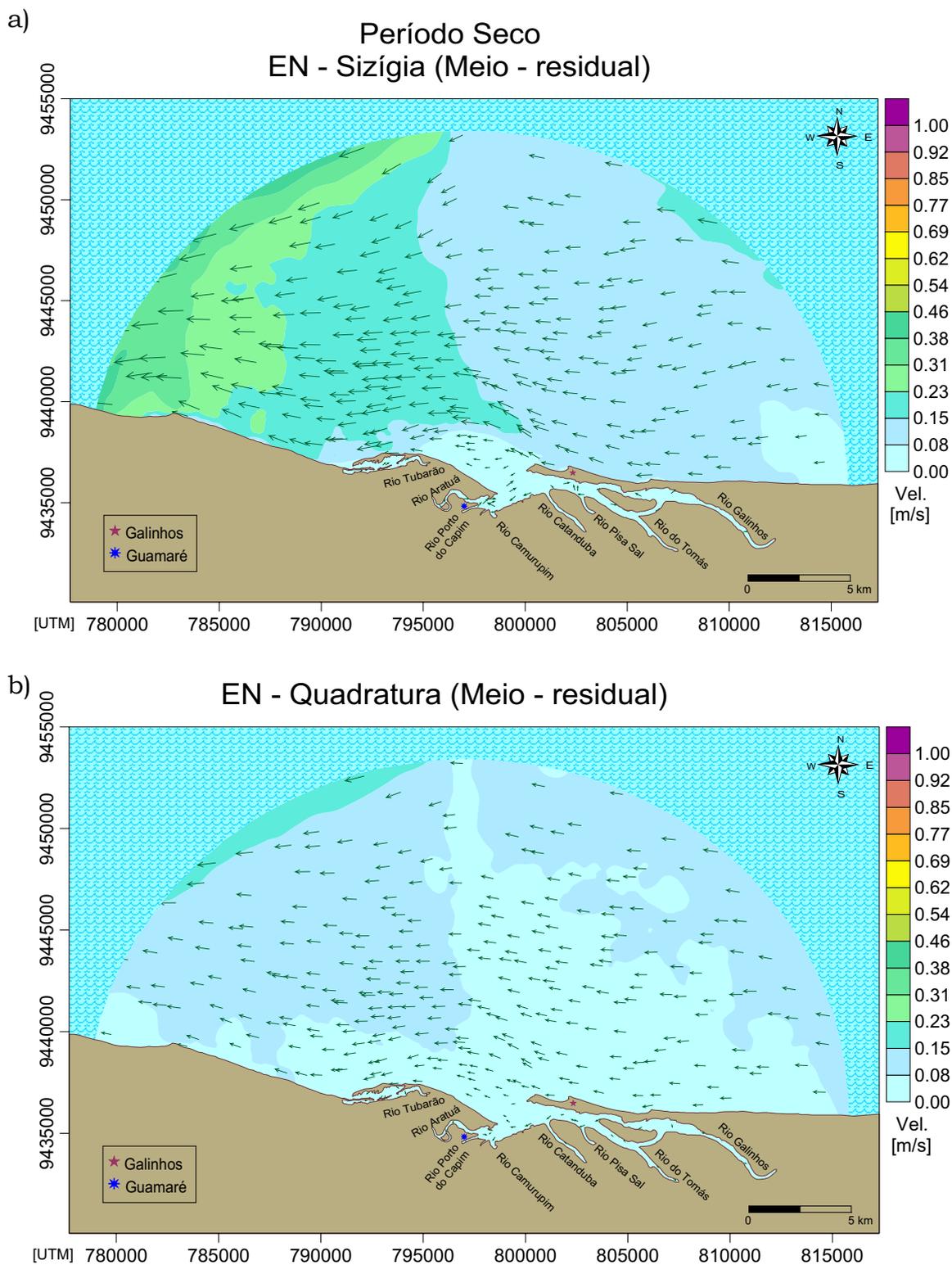
Na Figura 5.22, observa-se o comportamento das correntes residuais superficiais durante a enchente. Os vetores das velocidades de correntes apresentaram valores mais elevados durante a maré de sizígia ( $0,36 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana) onde as mais altas foram observadas na fronteira aberta a oeste-noroeste do domínio de integração. O sentido das correntes entre as marés foi bem distinto, fluindo para SO-O e para NO, respectivamente, na maré de sizígia e na de quadratura.

As correntes na metade da coluna de água (Figura 5.23) tiveram intensidades mais elevadas na maré de sizígia (mediana de  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ ), ao serem comparadas com as de quadratura (mediana de  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ ). Os valores mais altos puderam ser observados na maré de sizígia na parte esquerda da malha de integração. A direção das correntes, em ambas as marés, foi para O. Na região estuarina, o fluxo variou entre SO-NE, na sizígia, e para SO, na quadratura, levando à formação de pequenos vórtices na entrada do estuário.

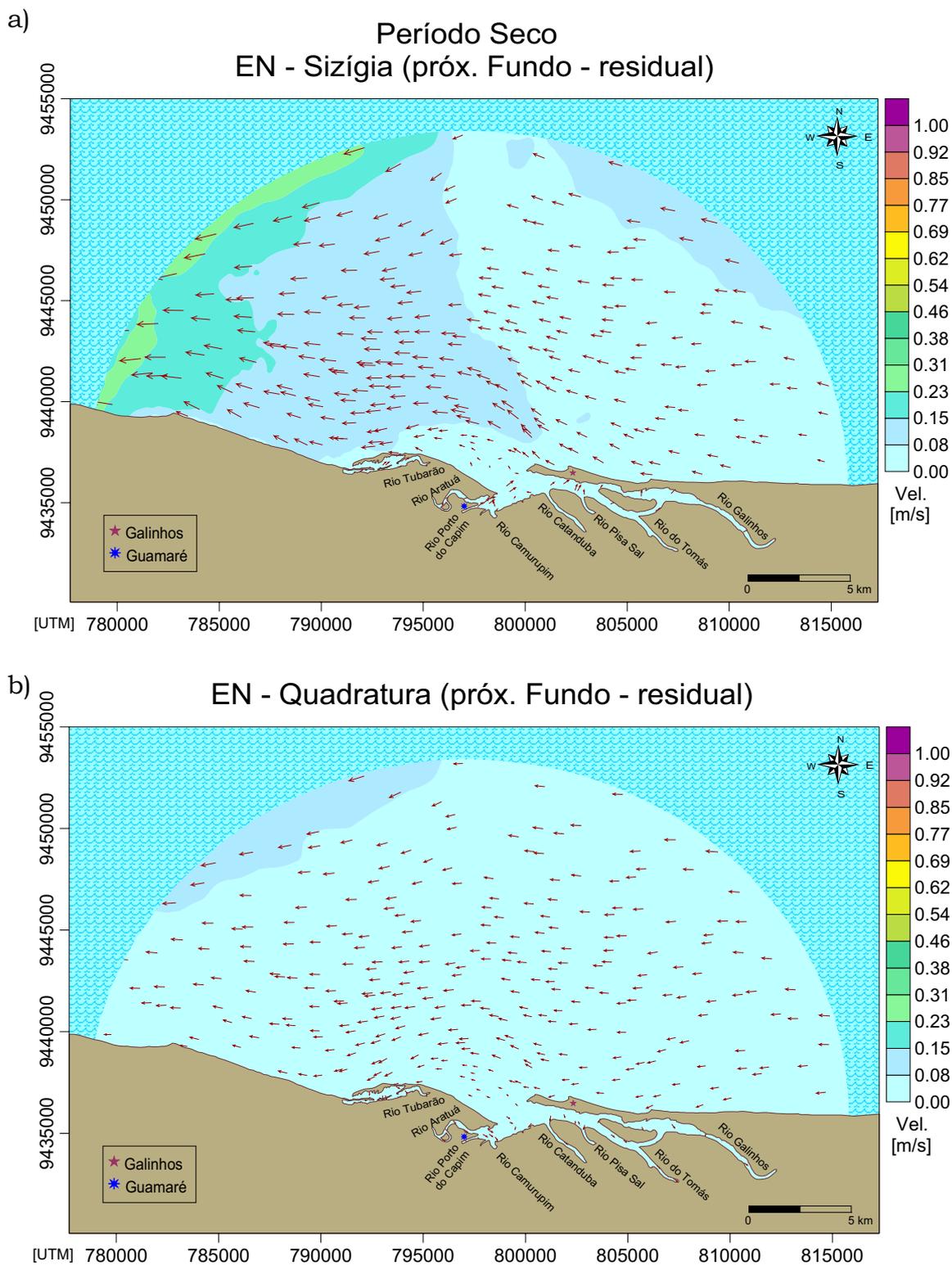
Para as correntes residuais de enchente próximas do fundo (Figura 5.24), durante o período da sizígia, as intensidades continuaram mais elevadas (mediana de  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ ), principalmente na parte esquerda do domínio, enquanto que, na maré de quadratura, a velocidade se mostrou mais uniforme (mediana de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ ). No entanto, o sentido destas correntes foi predominantemente para O, exceto dentro do estuário que se dirigiu para NE, na sizígia, e para S-SE, na quadratura.



**Figura 5.22.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco na superfície da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.23.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco no meio da coluna d’água da enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.



**Figura 5.24.** Valores residuais da velocidade das correntes do período seco próximas ao fundo durante a enchente de (a) sizígia e (b) quadratura.

### **(c) Análise dos resultados intrasazonais**

- ***Período chuvoso***

Os resultados das simulações apresentados nas seções anteriores permitiram verificar, para o período representativo da estação chuvosa, que as correntes residuais em toda a coluna d'água foram mais intensas durante a maré de quadratura. Este resultado evidencia a maior influência da forçante astronômica que produz as marés de sizígia. Durante estas últimas marés, as forças gravitacionais do Sol e da Lua estão aproximadamente alinhadas, provocando preamares muito altas e baixa-mares muito baixas (Miguens, 1993). Sendo assim, a circulação costeira durante as marés de quadratura é mais influenciada pela ação dos ventos, uma vez que as forçantes astronômicas são relativamente menos intensas.

A direção predominante das correntes do período chuvoso foi para oeste (O) em ambas as marés (sizígia e quadratura), sendo este comportamento praticamente padrão para as camadas do meio e perto do fundo da coluna d'água. No entanto, para as correntes residuais superficiais predominou o sentido noroeste (NO), exceto na baixa-mar e enchente da sizígia onde as correntes apontaram para oeste (O) e sudoeste (SO), respectivamente. A predominância da direção das correntes residuais para oeste (O e NO), de forma geral, se deve à ação dos ventos alíseos de sudeste (SE) que prevalecem durante o período chuvoso, conforme indicado na Figura 4.5. Esta preponderância é melhor representada nas correntes superficiais da maré de quadratura, com direção noroeste (NO).

A preamar da quadratura foi o estágio de maré com intensidades residuais mais altas, sendo o fluxo das águas predominante para noroeste (NO), na superfície, e para oeste (O), nas outras duas camadas, situação esta que foi padrão para todos os estágios da maré de quadratura. O fato das maiores intensidades residuais terem sido verificadas na situação de

estofo (preamar) de quadratura é, em grande parte, explicado pelo menor gradiente de pressão existente neste estágio e nesta maré.

As correntes com velocidades mais baixas foram observadas no estágio da vazante da maré de sizígia, onde o sentido foi para noroeste (NO), na superfície, e para oeste (O) no meio e próximo ao fundo da coluna d'água. As velocidades mais baixas durante a vazante da sizígia sugerem que a ação da maré tenha se contraposto à ação do vento de sudeste (SE). Assim, a intensidade da corrente residual foi baixa, permanecendo a direção imposta pela maré vazante (NO).

A maior diferença entre as medianas da velocidade residual na coluna de água ocorreu no estágio da preamar, onde os valores de quadratura da superfície, meio e fundo, foram, respectivamente, 1,9/ 3,1/ 3,3 vezes superiores aos valores de sizígia. Esta maior diferença é justificada devido à ação astronômica menor nas marés de quadratura, quando as correntes acabam sendo menos influenciadas pelas forças gravitacionais.

A menor diferença para as correntes residuais superficiais ocorreu entre as medianas da baixa-mar, sendo a de sizígia apenas 1,3 vezes menor do que a de quadratura, sugerindo, mais uma vez, que a forçante eólica tenha influenciado mais significativamente a maré de quadratura em toda a coluna d'água. Para o meio e próximo ao fundo da coluna d'água, as menores diferenças ocorreram durante a enchente, sendo, respectivamente, as medianas de sizígia apenas 1,5/ 1,3 vezes menores do que as de quadratura. Tal situação, nestes níveis da coluna d'água, confirma a influência decrescente dos ventos à medida que a profundidade aumenta a partir da superfície.

- ***Período seco***

Durante o período que representou a estação seca, foi possível observar que os resultados das correntes residuais em toda a coluna

d'água foram mais elevados na maré de quadratura, durante os estágios de preamar e vazante, e na maré de sizígia, durante o estágio da enchente. No entanto, para o estágio da baixa-mar, a velocidade das correntes superficiais foi maior na sizígia, enquanto que, as das correntes do meio e próximo do fundo da coluna d'água foram ligeiramente maior na quadratura.

A direção predominante das correntes residuais neste período de estiagem foi para oeste (O) em ambas as marés, onde este comportamento mostrou-se praticamente padrão para as camadas do meio e perto do fundo da coluna d'água. No entanto, para as correntes superficiais predominou um transporte residual no sentido noroeste (NO), com exceção da vazante, baixa-mar e enchente da sizígia, quando as correntes se direcionaram para oeste (O), na primeira, e para sudoeste (SO-O) nos outros dois estágios.

As maiores intensidades e direções predominantes de correntes residuais são devido à ação dos ventos (Figura 4.7) que são de sudeste (SE) e de leste (L).

O estágio da preamar da quadratura teve as maiores intensidades de corrente residual, sendo o fluxo das águas predominante para oeste-noroeste (O-NO), na superfície, e para oeste (O), nas outras duas camadas. Estas direções foram comuns para todos os estágios da maré de quadratura. Tal comportamento foi similar ao constatado durante o período chuvoso, o que confirma a minimização do efeito gravitacional durante os períodos de estofó e de quadratura.

As correntes residuais com velocidades mais baixas foram observadas no estágio da preamar da maré de sizígia, onde o fluxo das águas foi para oeste-noroeste (O-NO), na superfície, e para oeste (O) no meio e próximo ao fundo da coluna d'água.

A maior diferença entre as medianas da velocidade residual em toda a coluna de água ocorreu no estágio da preamar. As medianas de

quadratura da superfície, meio e fundo, apresentaram valores, respectivamente, 2,8/ 2,7/ 2,8 vezes maiores do que os de sizígia.

As menores diferenças entre as medianas da velocidade das correntes residuais ocorreram em diferentes estágios. Assim, a mediana a maré de quadratura foi apenas 1,3 vezes maior na superfície da vazante e 1,4 vezes maior próximo do fundo da baixa-mar; contudo, a mediana a maré de sizígia foi 1,2 vezes maior na camada intermediária da baixa-mar. Estas diferenças se explicam analisando-se a ação dos ventos. Na preamar da quadratura, os ventos alíseos de sudeste (SE) contribuíram para uma maior intensidade das correntes residuais. Contudo, na enchente da quadratura, a predominância destes mesmos ventos levou a uma menor intensidade das correntes, ao passo que os ventos alíseos de nordeste (NE) favoreceram a intensidade das correntes residuais durante a maré de sizígia. Portanto, a mediana dos valores de corrente residual no estágio de enchente de ambas as marés mostraram pouca diferença.

### **5.1.2. Variabilidade intersazonal - período chuvoso e período seco**

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados das simulações em termos de campo cinemático residual, mas com o objetivo de evidenciar a variabilidade intersazonal da circulação costeira na Bacia Potiguar. Visando facilitar a interpretação dos resultados, as figuras relativas aos campos cinemáticos apresentadas na seção anterior foram aqui reagrupadas coerentemente.

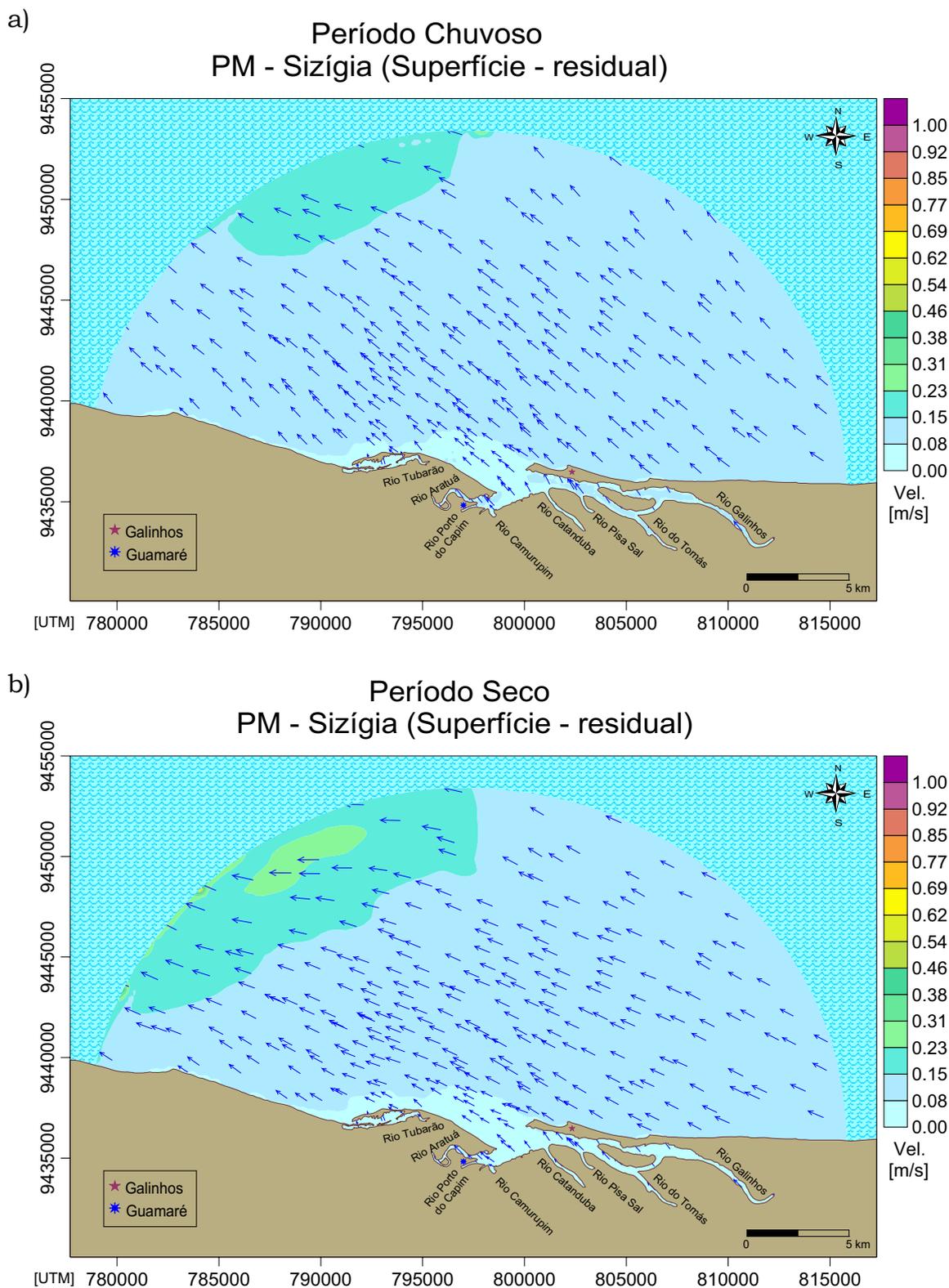
#### **(a) Sizígia**

As figuras representativas dos campos residuais durante a maré de sizígia para os períodos de maio a julho (chuvoso) e de novembro a janeiro (seco) são apresentadas nas Figuras 5.25 a 5.36.

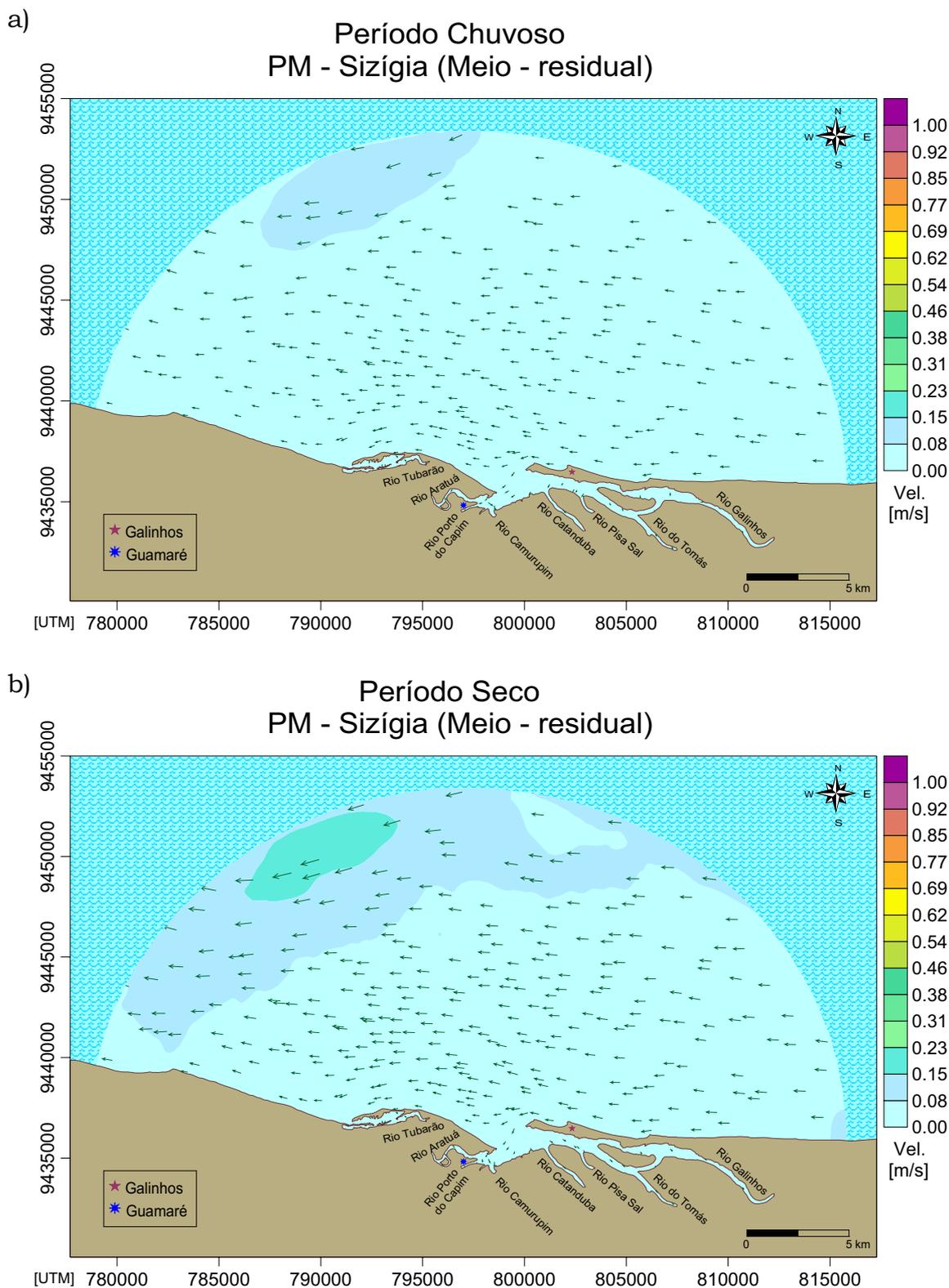
As intensidades das correntes superficiais (Figura 5.25) no momento da preamar se mostraram parecidas durante os períodos chuvoso e seco (medianas de 0,12 e 0,13 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente). Valores um pouco maiores podem ser observados na região noroeste do domínio modelado em ambos os períodos. Os vetores destas correntes apontam preferencialmente para NO e para O durante os períodos chuvoso e seco, respectivamente.

Para o meio da coluna d'água neste mesmo estágio (Figura 5.26), observaram-se intensidades similares entre os dois períodos na área mais próxima a costa. No entanto, valores maiores puderam ser vistos na parte norte-noroeste do domínio de integração, principalmente durante o período seco. Quanto à direção destas correntes, esta apontou para O nestes dois períodos sazonais. Contudo, observa-se um fluxo de água entrando no estuário e se direcionando para S-SO, no período de chuva, e para S-SE, no período seco.

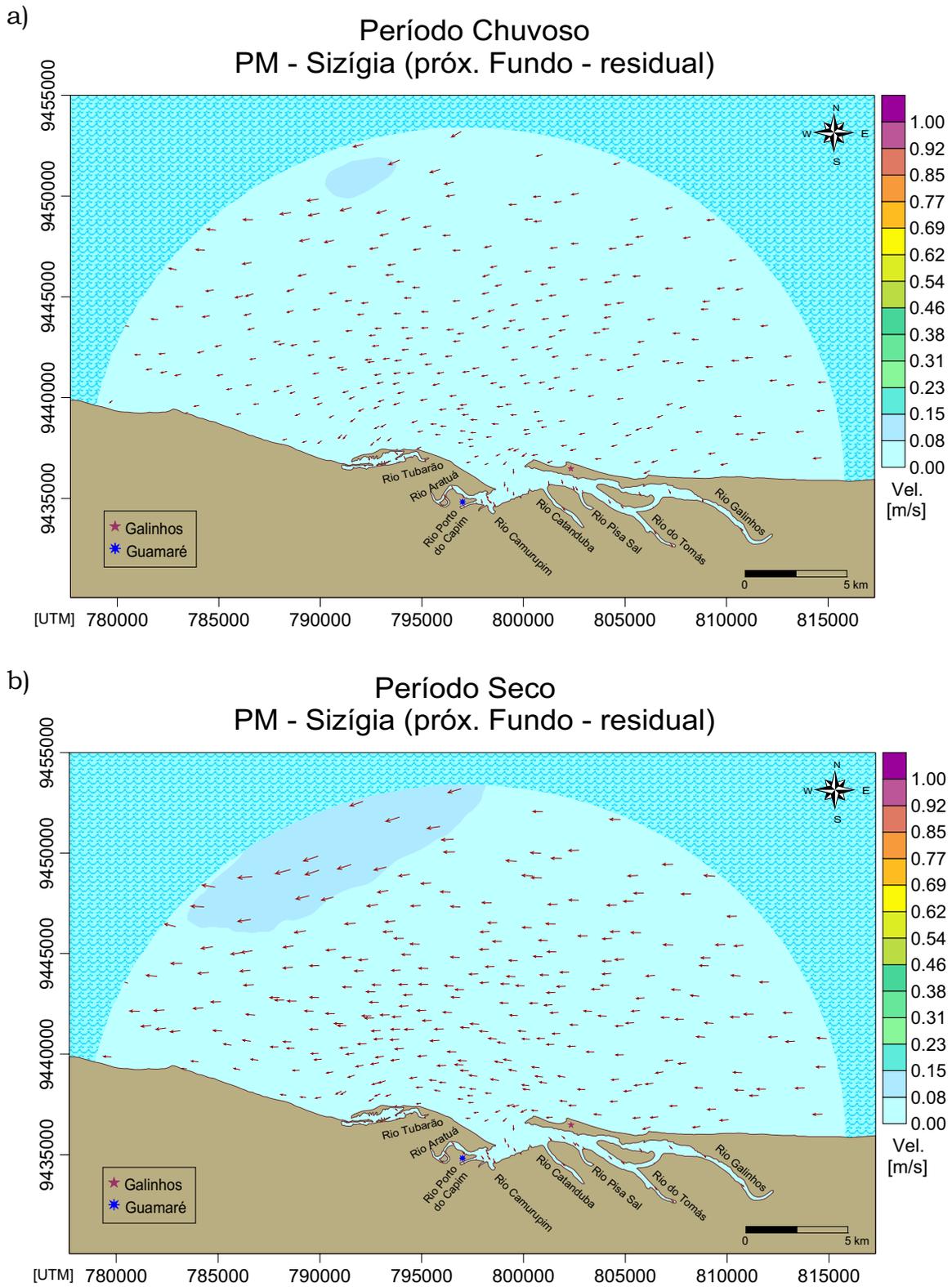
As correntes próximas do fundo (Figura 5.27) se assemelharam bastante sazonalmente. Valores de intensidade de correntes ligeiramente maiores podem ser observados na área mais a noroeste da malha, principalmente durante o período de estiagem. O fluxo nesta profundidade se dirige para O em ambos os períodos, porém, há uma leve tendência para SO no período úmido. Igualmente ao meio da coluna de água, observam-se vetores velocidade entrando no complexo estuarino e fluindo para S-SE em ambos os períodos.



**Figura 5.25.** Valores residuais da velocidade das correntes superficiais da preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.26.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

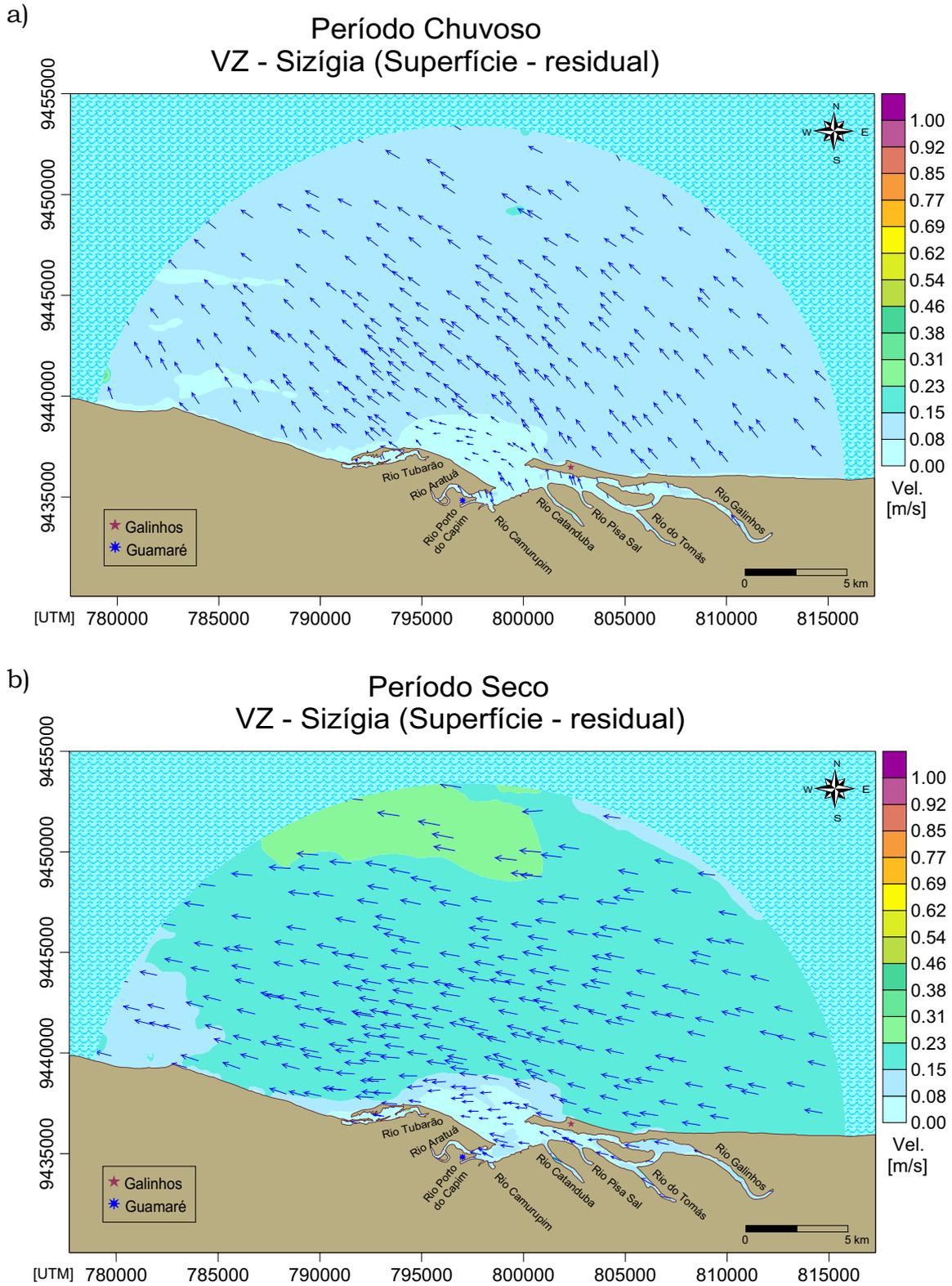


**Figura 5.27.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a preamar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

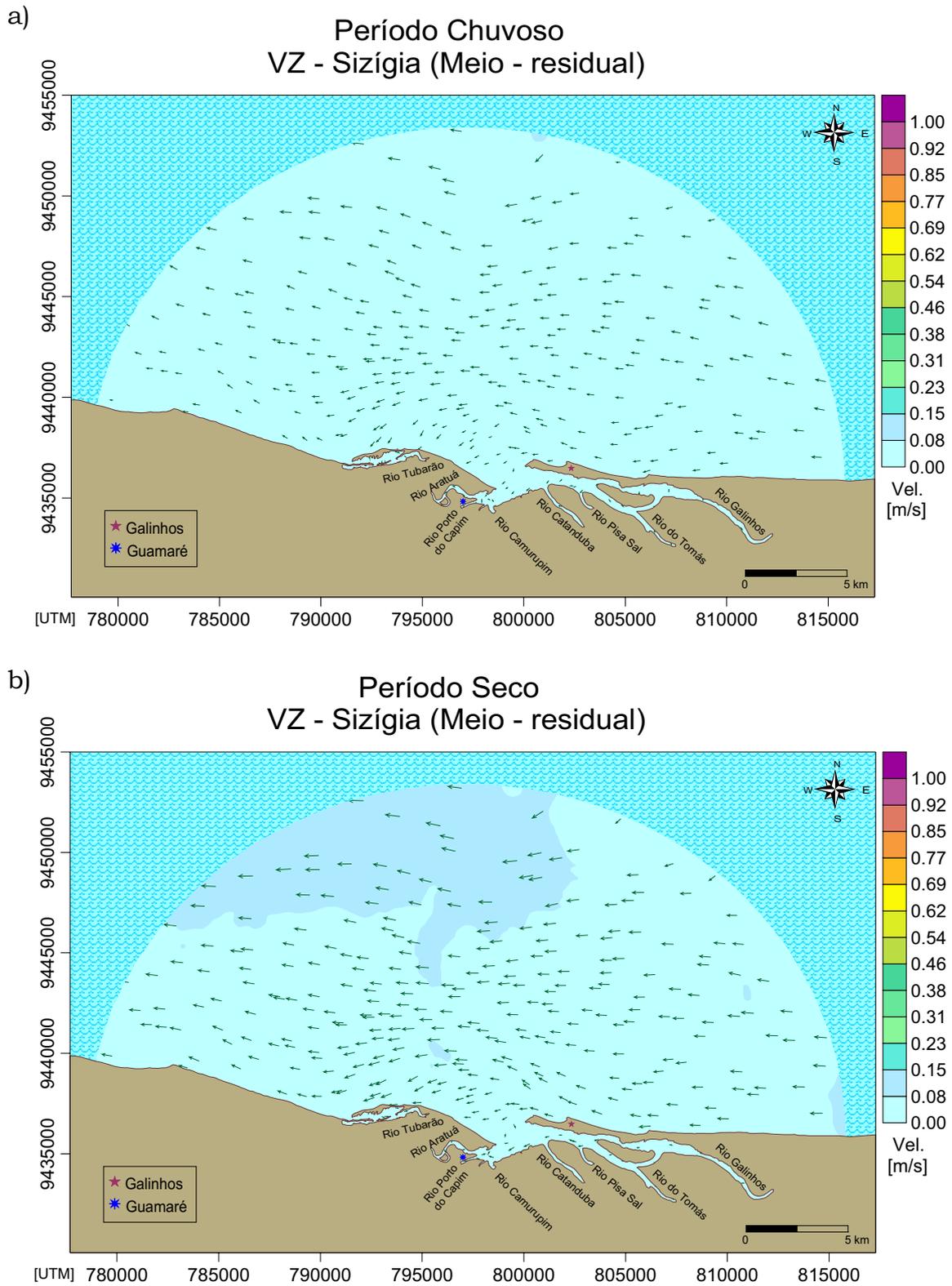
Na maré vazante do período chuvoso, as correntes residuais superficiais (Figura 5.28-a) apresentaram valores baixos de intensidade ( $0,10 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana) e direção predominante para NO em todo o domínio espacial. No entanto, este mesmo estágio durante o período de estiagem (Figura 5.28-b) apresentou intensidades ( $0,17 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana) consideravelmente mais altas do que o período úmido, principalmente na região norte do domínio, com direção apontando para O.

As correntes residuais no meio da coluna de água (Figura 5.29) apresentaram-se com velocidades baixas e praticamente uniformes no período chuvoso, com vetores apontando preferencialmente para O. Para o período de estiagem, as intensidades foram ligeiramente maiores ( $0,06 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana), principalmente na parte norte do domínio, porém, também se dirigiram para O. Na região estuarina, observou-se um fluxo entrando nesta área com velocidades relativamente iguais e baixas em direção sul (variando entre SO e SE) nos dois períodos sazonais.

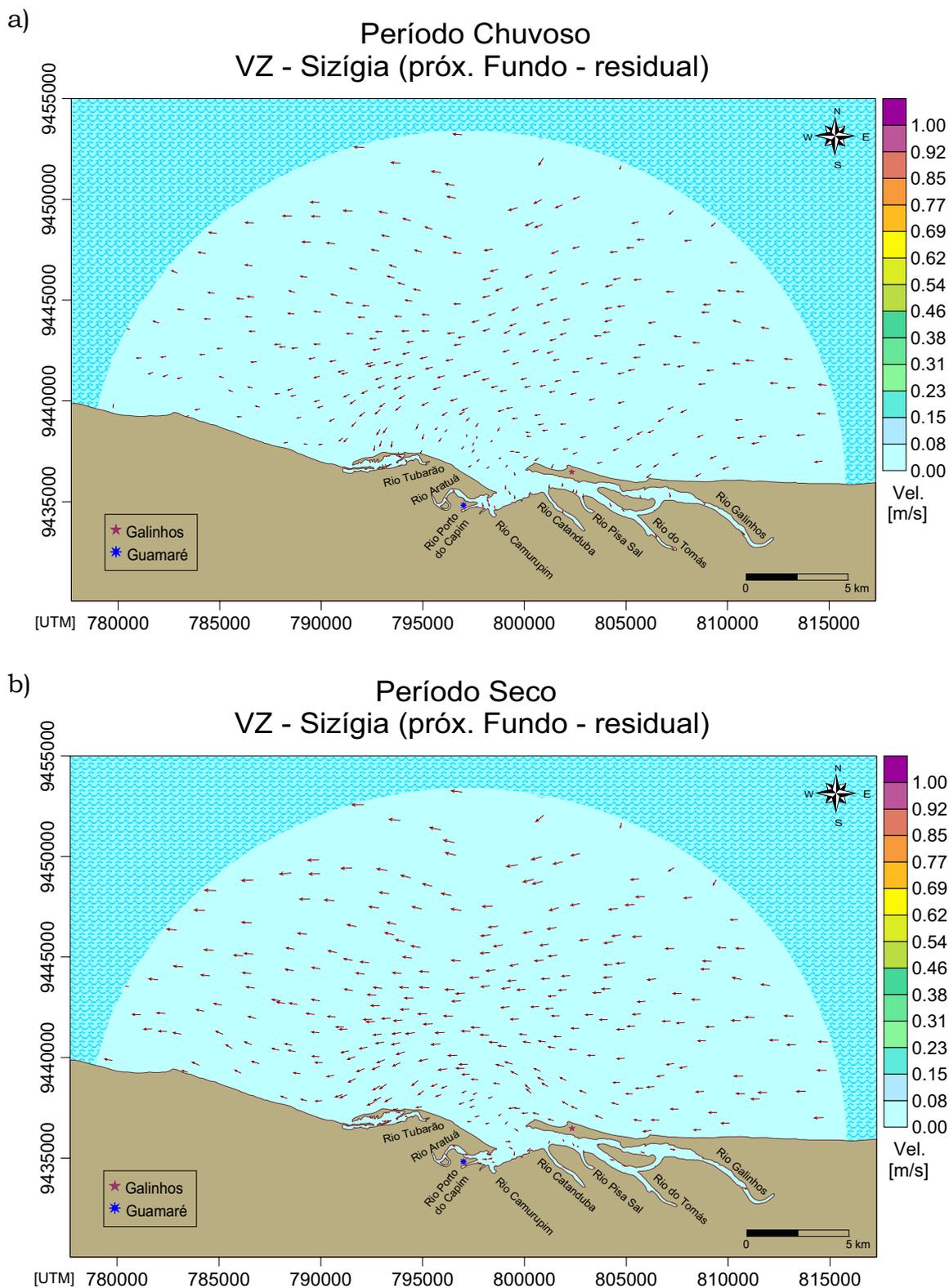
Nas correntes residuais próximas ao fundo (Figura 5.30), as intensidades se assemelharam (diferença das medianas de apenas  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$  a mais no período seco) nas duas épocas apresentando valores baixos e uniformes em toda a malha e com fluxo apontando para O. Observou-se também que na área do estuário há vetores entrando nesta região com valores baixos e apontando para S-SE.



**Figura 5.28.** Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.29.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

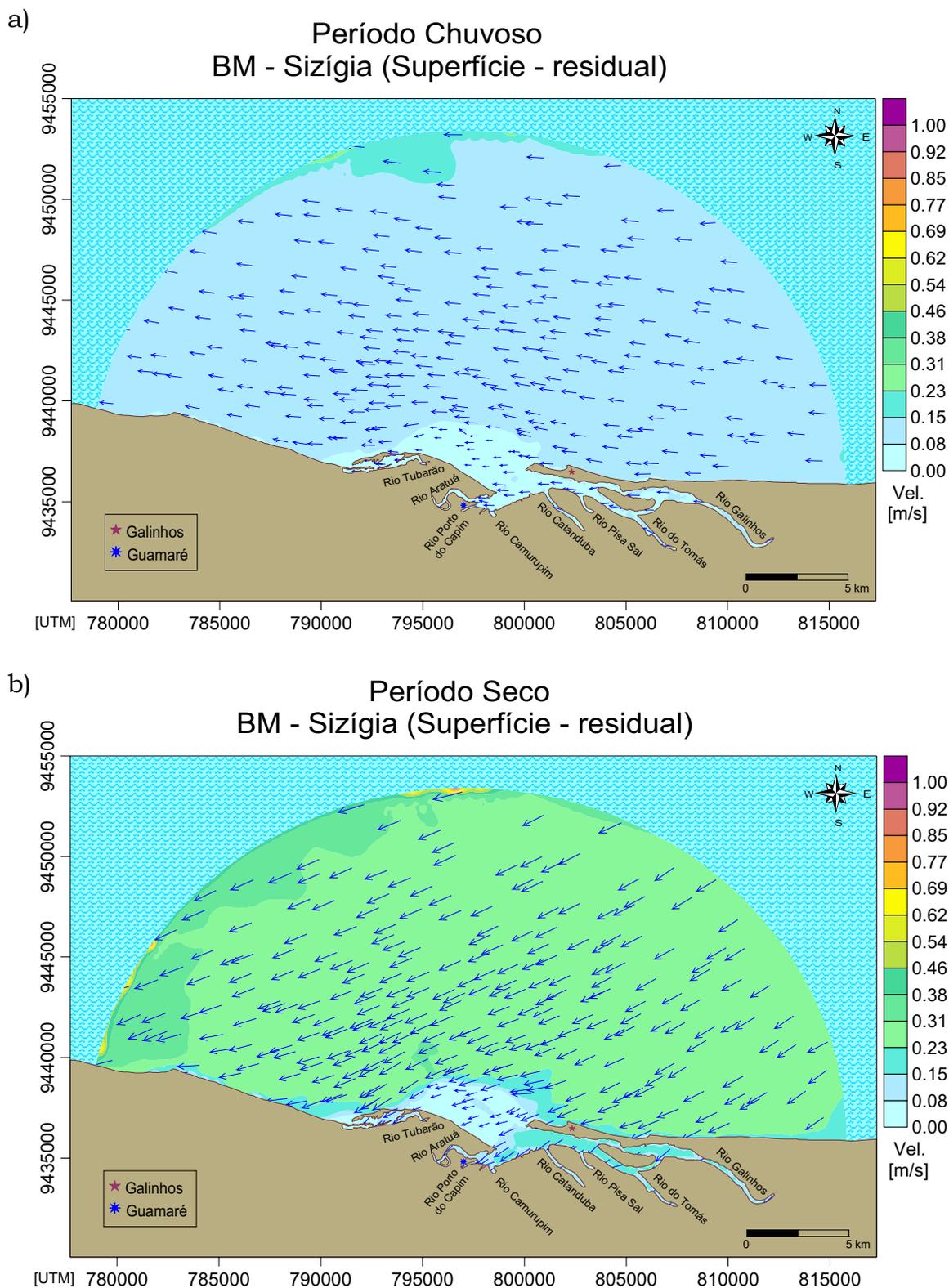


**Figura 5.30.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a vazante de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

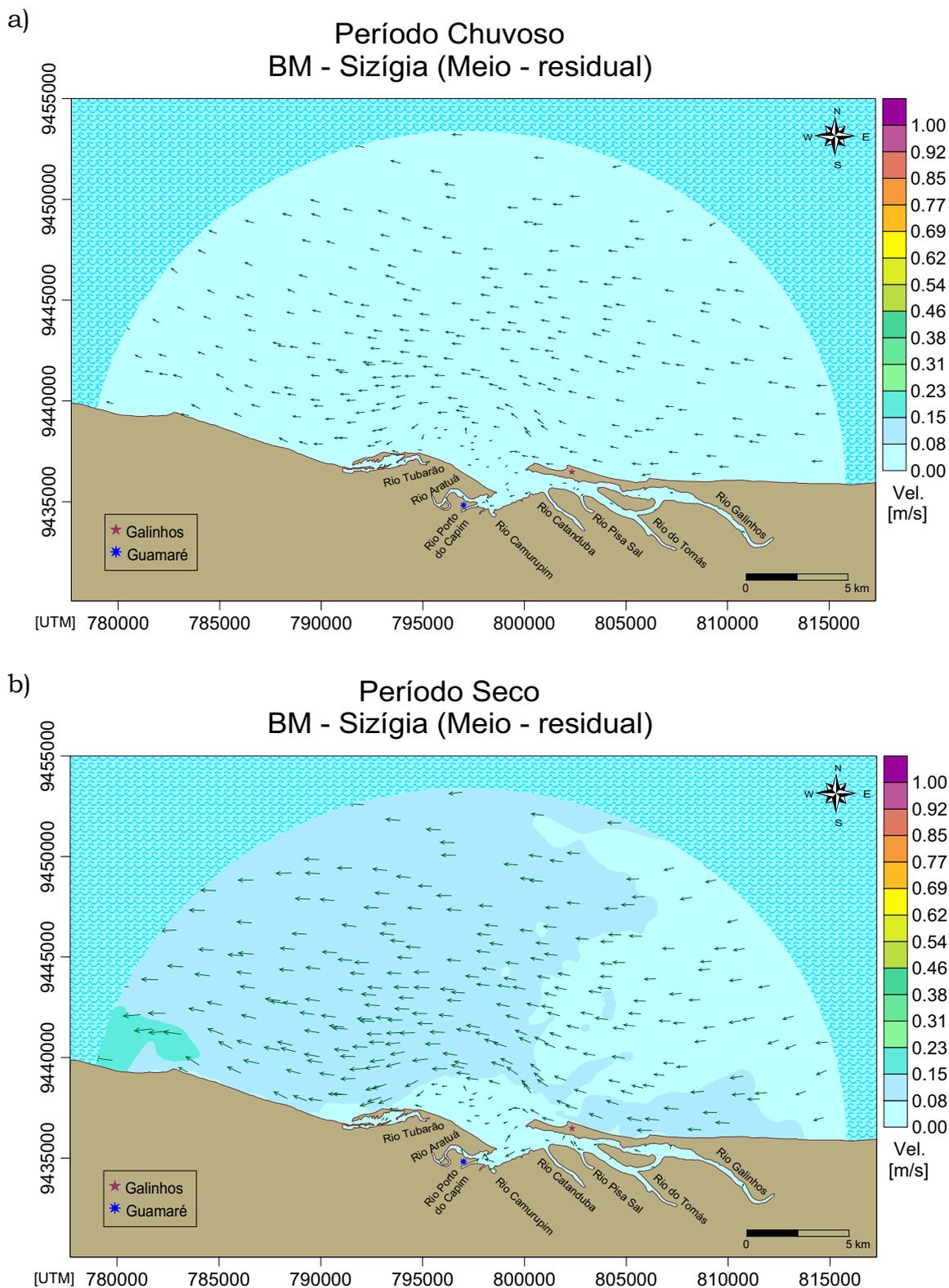
As correntes residuais observadas no estágio de baixa-mar mostraram que, em comparação com a época de estiagem, os vetores na superfície (Figura 5.31) apontaram para O durante o período chuvoso com intensidades baixas ( $0,13 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana) e quase uniformes. Apenas uma pequena região ao norte da malha mostrou valores um pouco maiores. Já no período seco, as intensidades praticamente dobraram em quase todo o domínio espacial ( $0,28 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana), com correntes direcionadas para O-SO. No estuário, as direções seguiram o padrão geral, porém com intensidades menores.

Na metade da coluna de água deste estágio (Figura 5.32), as intensidades diminuíram bastante nos dois períodos em relação à superfície, no entanto, os maiores valores permaneceram durante a estiagem ( $0,08 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana). A direção das correntes apontou com predominância para O. Porém, dentro do estuário os vetores se direcionam para L-SE formando dois vórtices na entrada do estuário, no período chuvoso, e mais frequentemente para NE, na época seca, formando um vórtice também na entrada do mesmo.

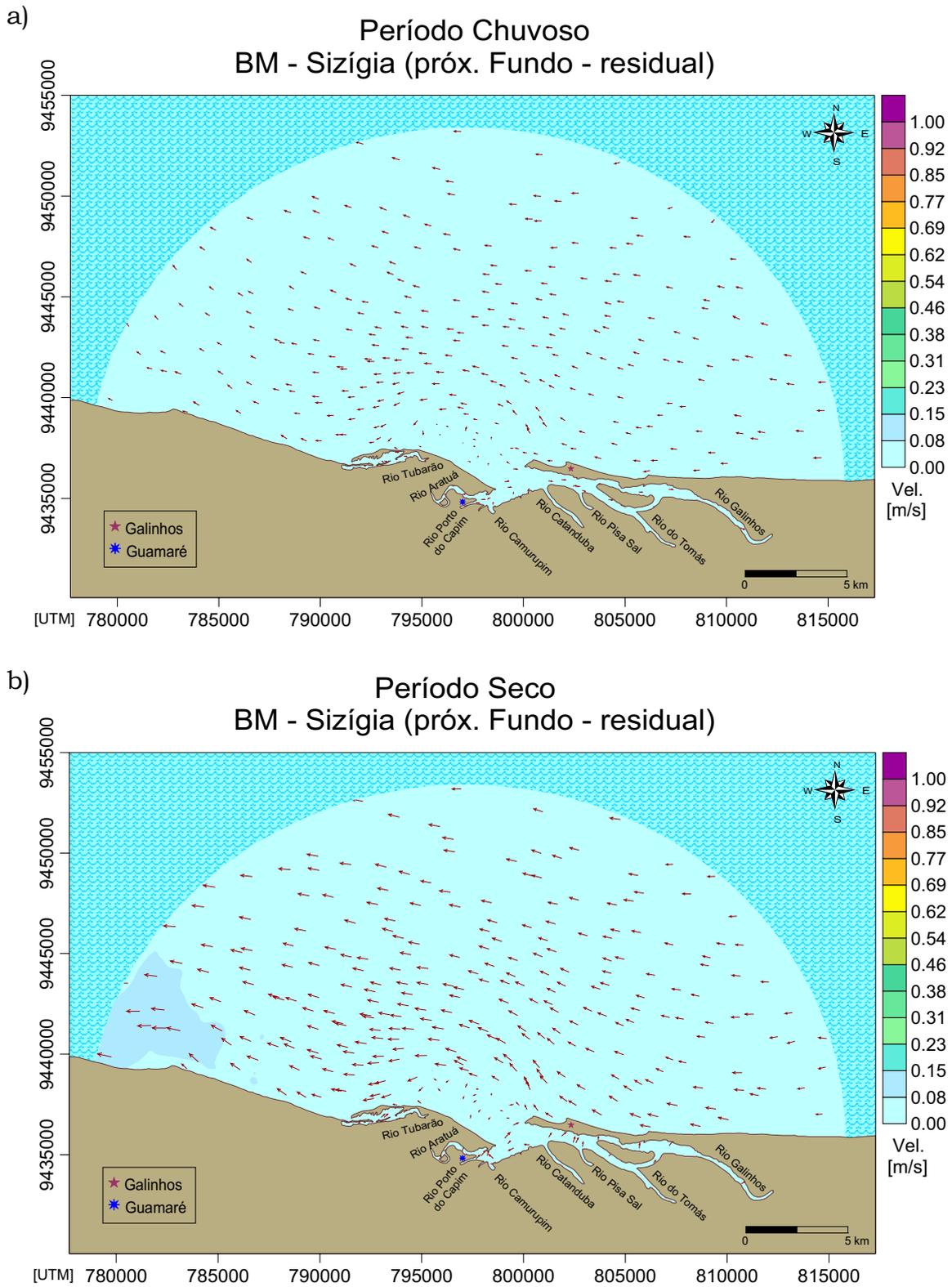
Próximo ao fundo (Figura 5.33), as intensidades das correntes residuais de baixa-mar se apresentaram relativamente uniformes e com valores baixos (5 vezes menor que na superfície) nas duas épocas distintas, sendo a direção preponderante para O. Contudo, valores maiores são encontrados no período de estiagem ( $0,04 \text{ m.s}^{-1}$  de mediana), principalmente a oeste do domínio de integração. Quanto à região estuarina, a direção apontou predominantemente para NE e para SO, respectivamente nos períodos seco e chuvoso.



**Figura 5.31.** Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.32.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

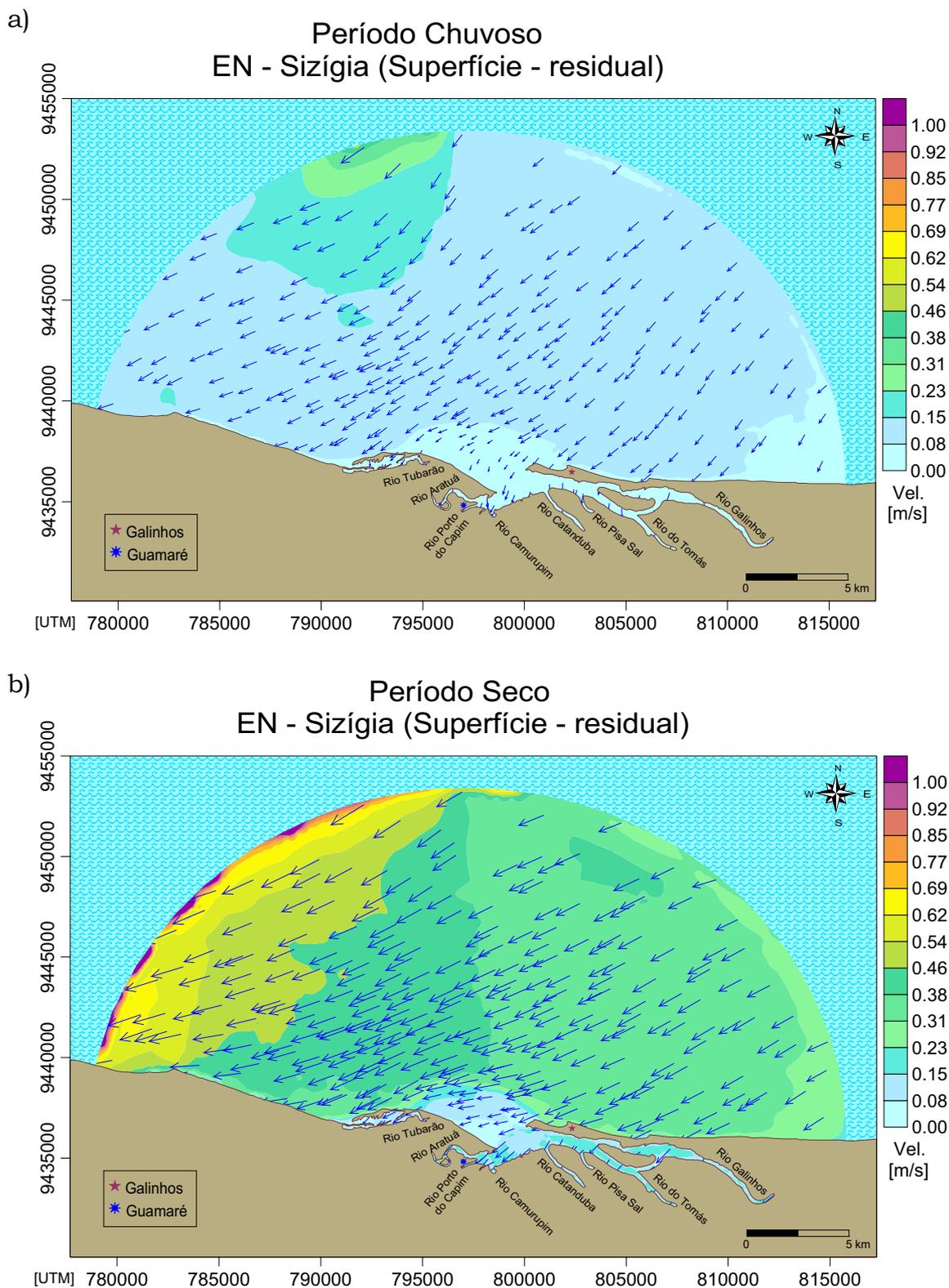


**Figura 5.33.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

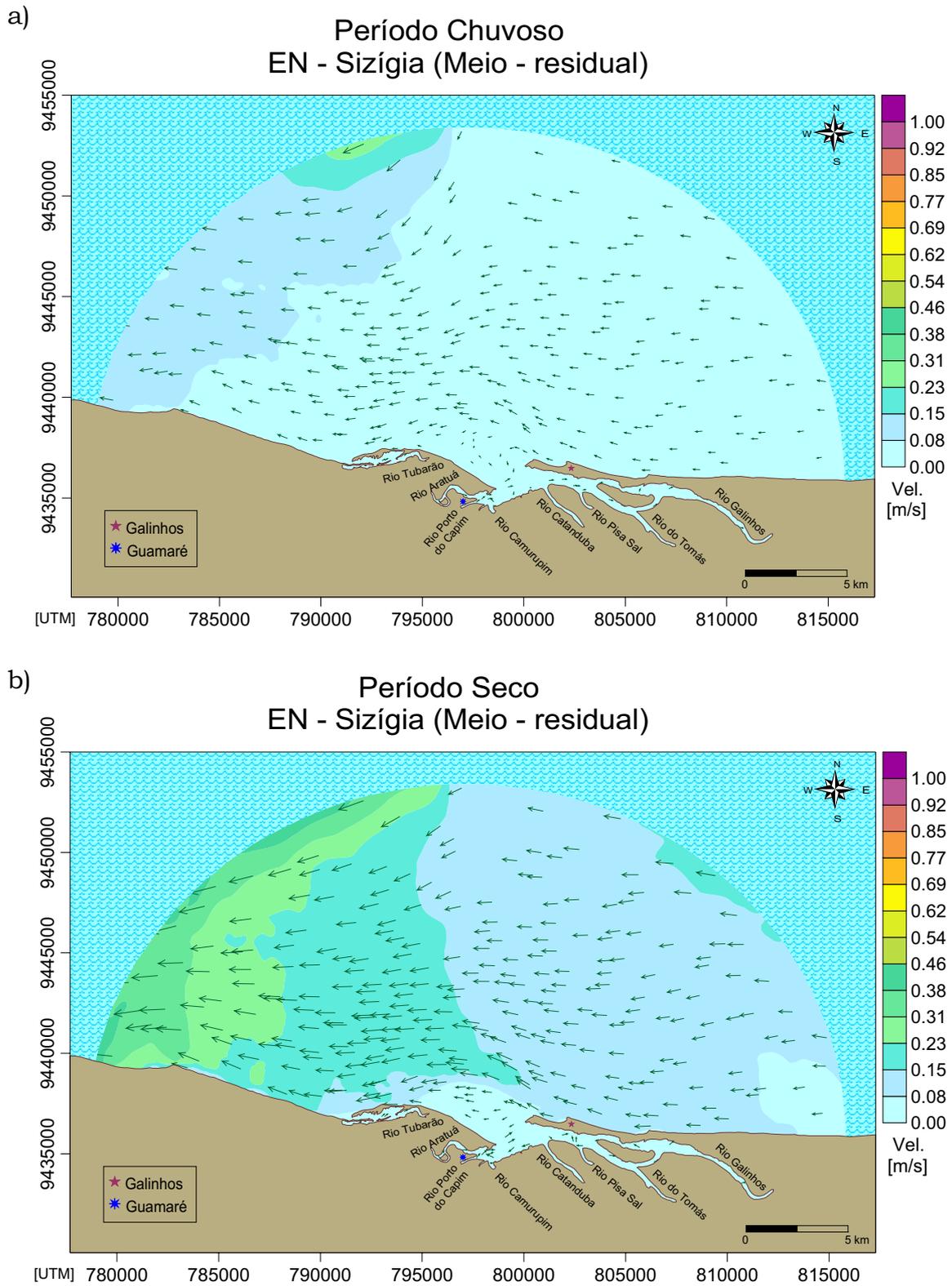
Durante o período chuvoso, observa-se que as correntes residuais superficiais da enchente (Figura 5.34-a) apresentaram intensidades baixas (valor mediano de  $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ ) em relação ao período seco (mediana de  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$ ). Os maiores valores destas intensidades são encontrados na parte esquerda do domínio de integração, localizando-se a noroeste (no período chuvoso) e de norte a sul (no período de estiagem) desta região. No entanto, a direção predominante nestes dois períodos foi para O-SO.

As correntes localizadas no meio da coluna d'água (Figura 5.35) apresentaram intensidades sazonais distintas, com valores medianos de aproximadamente  $0,04$  e  $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente para os períodos de chuva e estiagem. Os valores mais elevados puderam ser observados na parte oeste da malha. A direção das correntes apontou para O em ambos os períodos, havendo uma pequena área na parte noroeste da área de estudo em que os vetores apontaram para SO. Pôde ser observado um fluxo com intensidades baixas, porém similares sazonalmente, entrando na região estuarina. No entanto, as direções mais predominantes apontaram para L, na época chuvosa, e para L-NE, no período de estiagem, formando em ambos os períodos um vórtice logo na entrada do estuário.

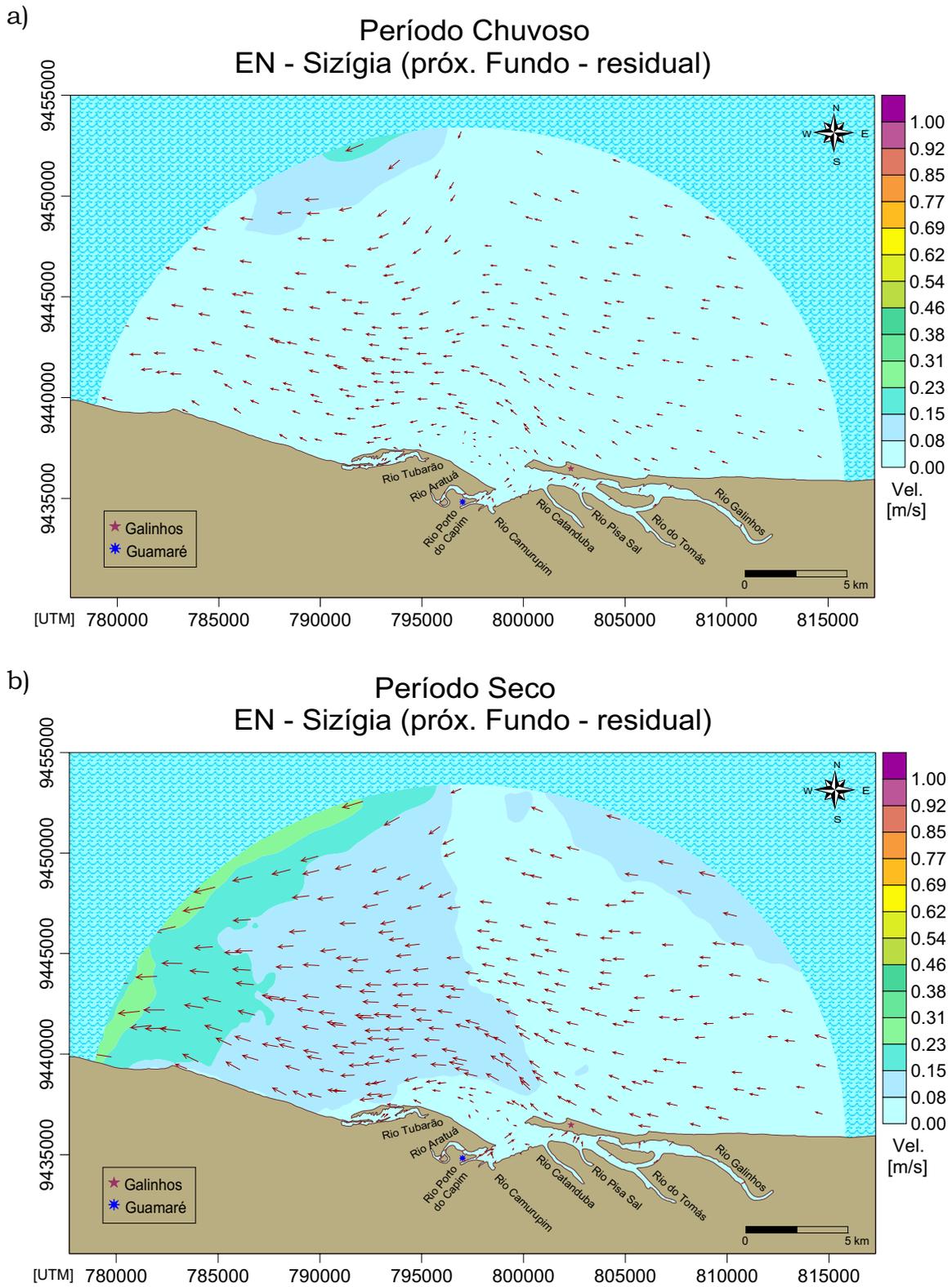
O transporte residual próximo ao fundo (Figura 5.36) mostrou intensidades com valores medianos de  $0,03$  e  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$  para os períodos de chuva e estiagem, respectivamente. Assim, as velocidades foram maiores no período seco, principalmente na área esquerda do domínio de estudo. Contudo, o fluxo se dirigiu para O de forma predominante nas duas épocas, havendo uma pequena área com vetores para SO, conforme observado no meio da coluna d'água. Dentro do estuário a intensidade do fluxo se assemelha entre os períodos chuvoso e seco, bem como a sua direção que aponta para NE.



**Figura 5.34.** Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.35.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.36.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a enchente de sizígia para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

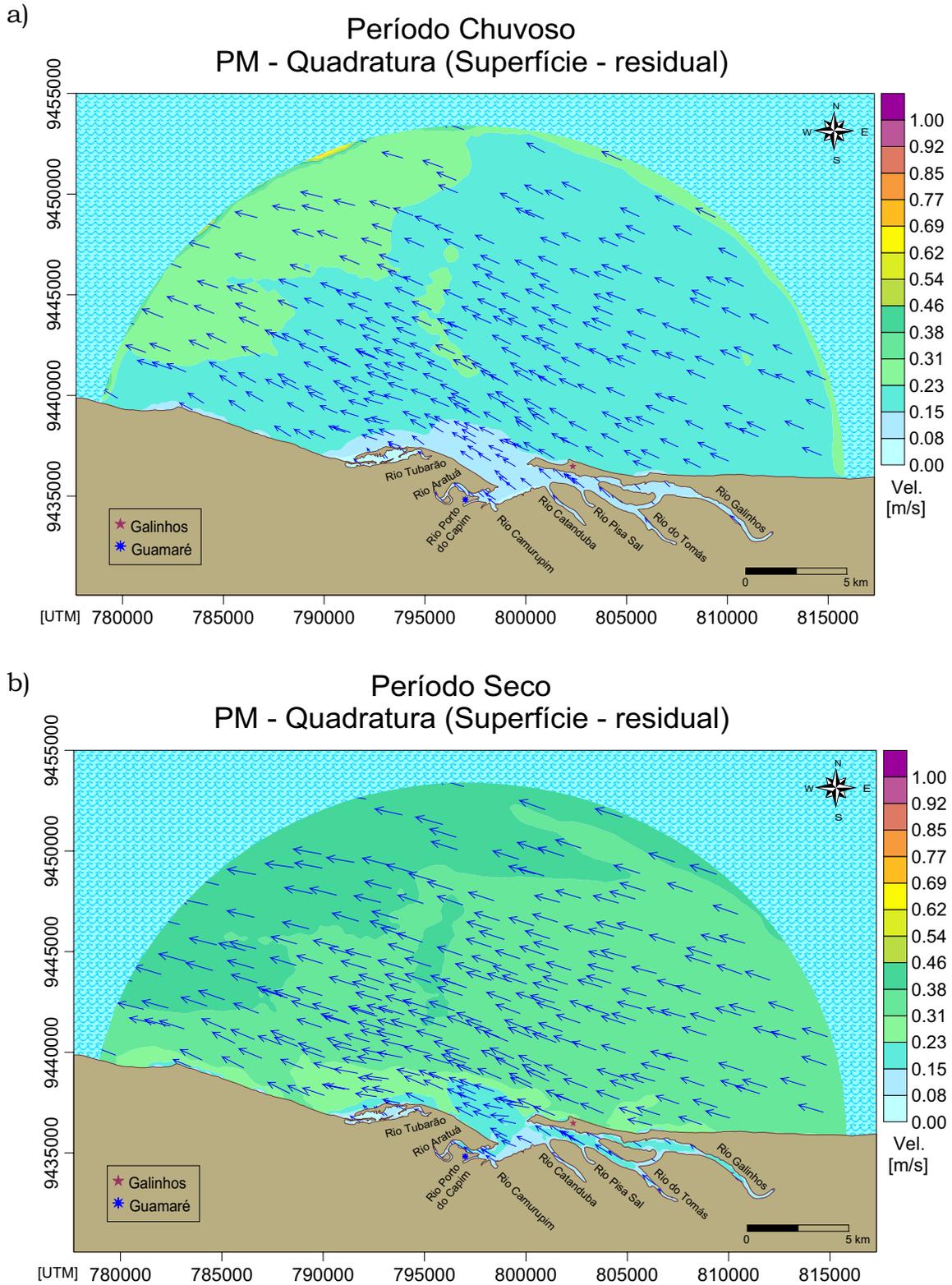
**(b) Quadratura**

As correntes residuais sazonais (períodos chuvoso e seco) para forçante de maré de quadratura são apresentadas nas Figuras 5.37 a 5.48.

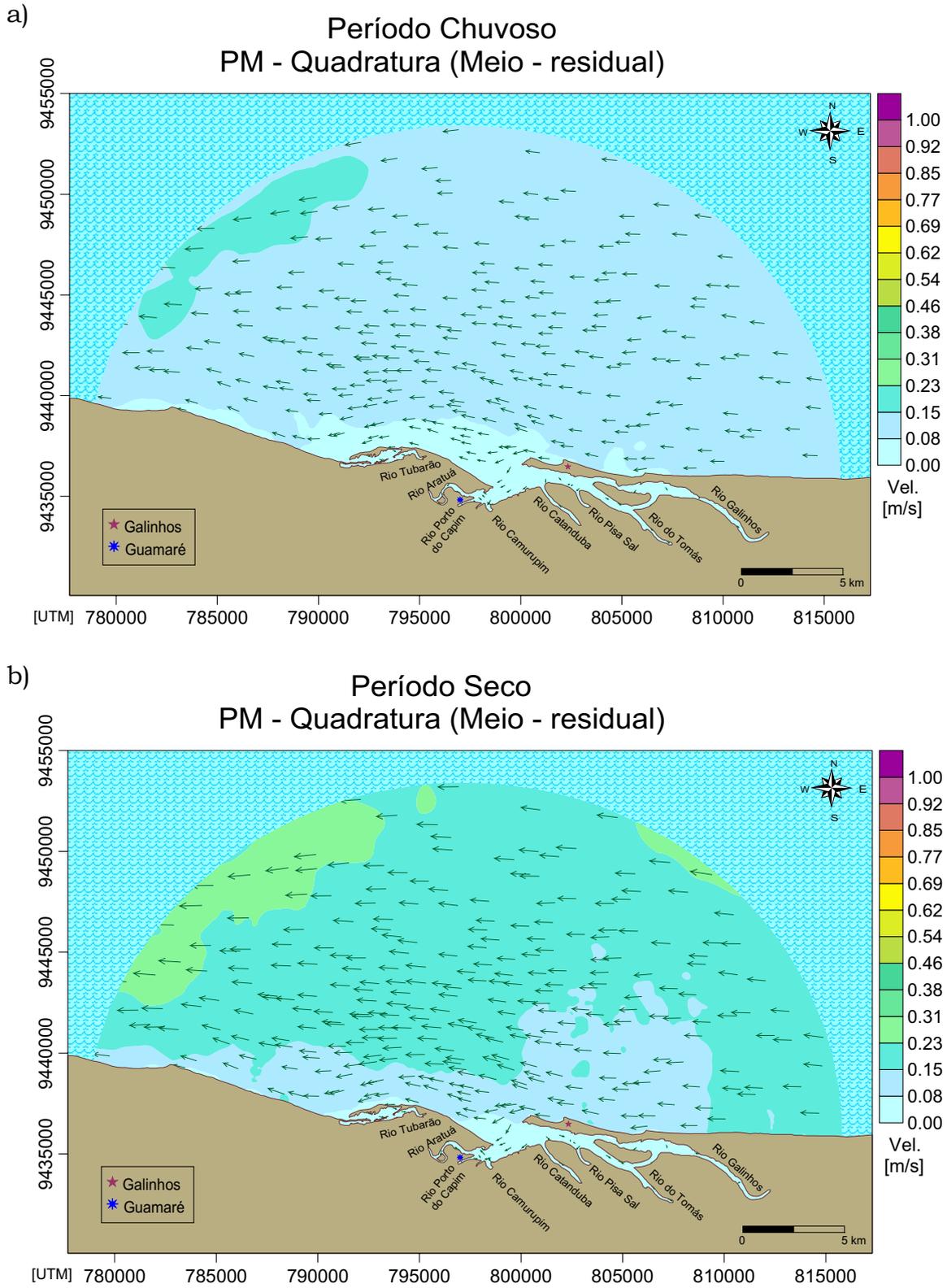
As correntes superficiais da preamar (Figura 5.37) durante o período de chuva apresentaram intensidades variadas (mediana de  $0,22 \text{ m.s}^{-1}$ ) com maiores valores na fronteira aberta do domínio modelado, principalmente na região noroeste. As intensidades das correntes residuais durante o período seco exibiram valores maiores e mais uniformes, com uma mediana de  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$ . Com relação à direção, os vetores de velocidade das correntes apontaram predominantemente para O-NO nos dois períodos sazonais.

No meio da coluna de água (Figura 5.38), as intensidades das correntes residuais foram, aproximadamente, duas vezes menores do que as da superfície, com uma mediana de  $0,11 \text{ m.s}^{-1}$  e de  $0,18 \text{ m.s}^{-1}$  nos períodos de chuva e estiagem, respectivamente. O fluxo das águas nos dois períodos se dirigiu com predominância para O, havendo entrada deste no estuário e variando sua direção para SO e SE.

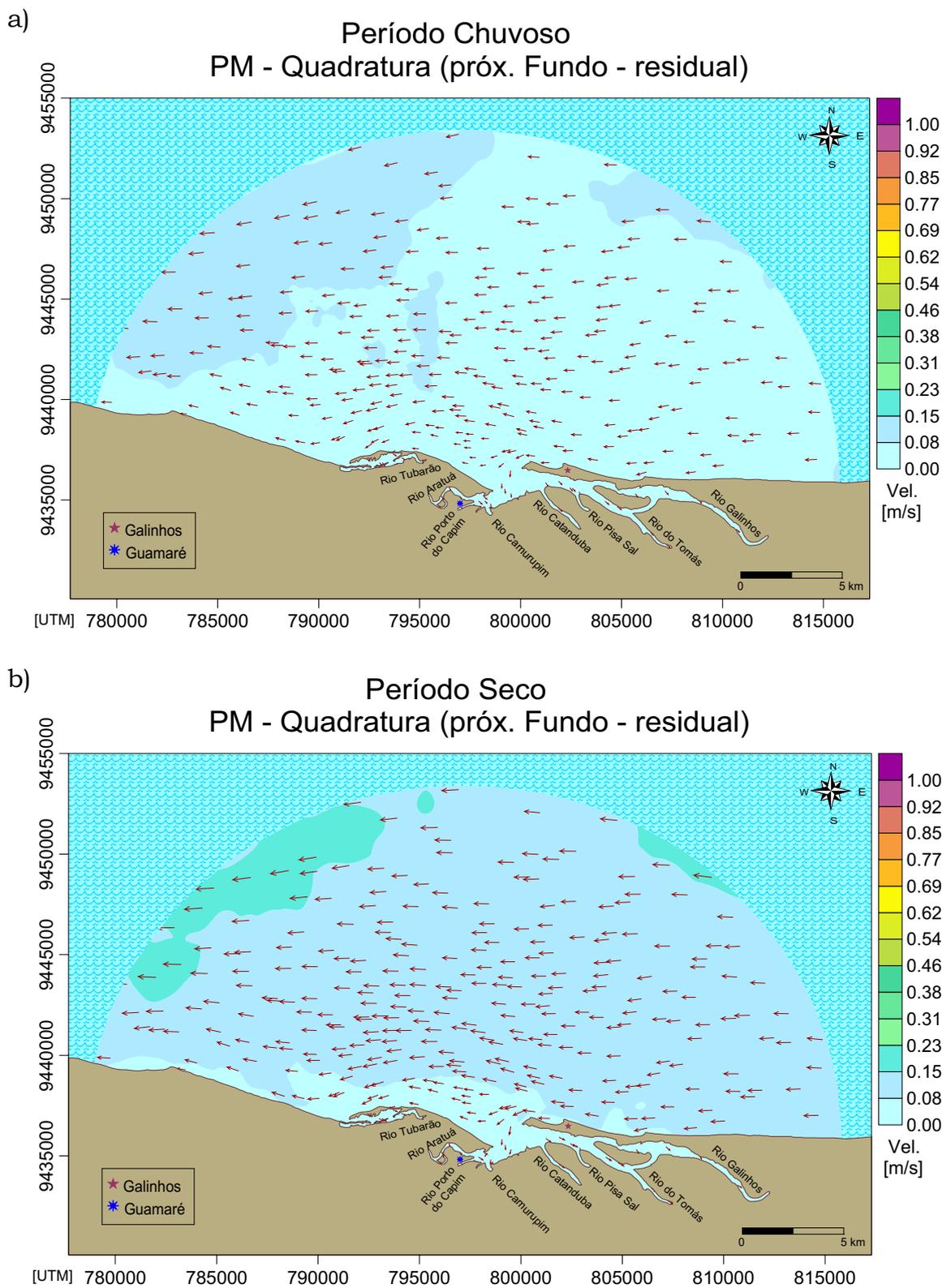
As correntes da preamar próximas do fundo (Figura 5.39) apresentaram intensidades, aproximadamente, três vezes menores do que na superfície, com uma mediana de  $0,06 \text{ m.s}^{-1}$ , na época chuvosa, e de  $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ , na época de estiagem. A direção predominante durante estes dois períodos foi para O, enquanto que esta apontou com predominância para SE dentro do estuário.



**Figura 5.37.** Valores residuais da velocidade das correntes superficiais da preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.38.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

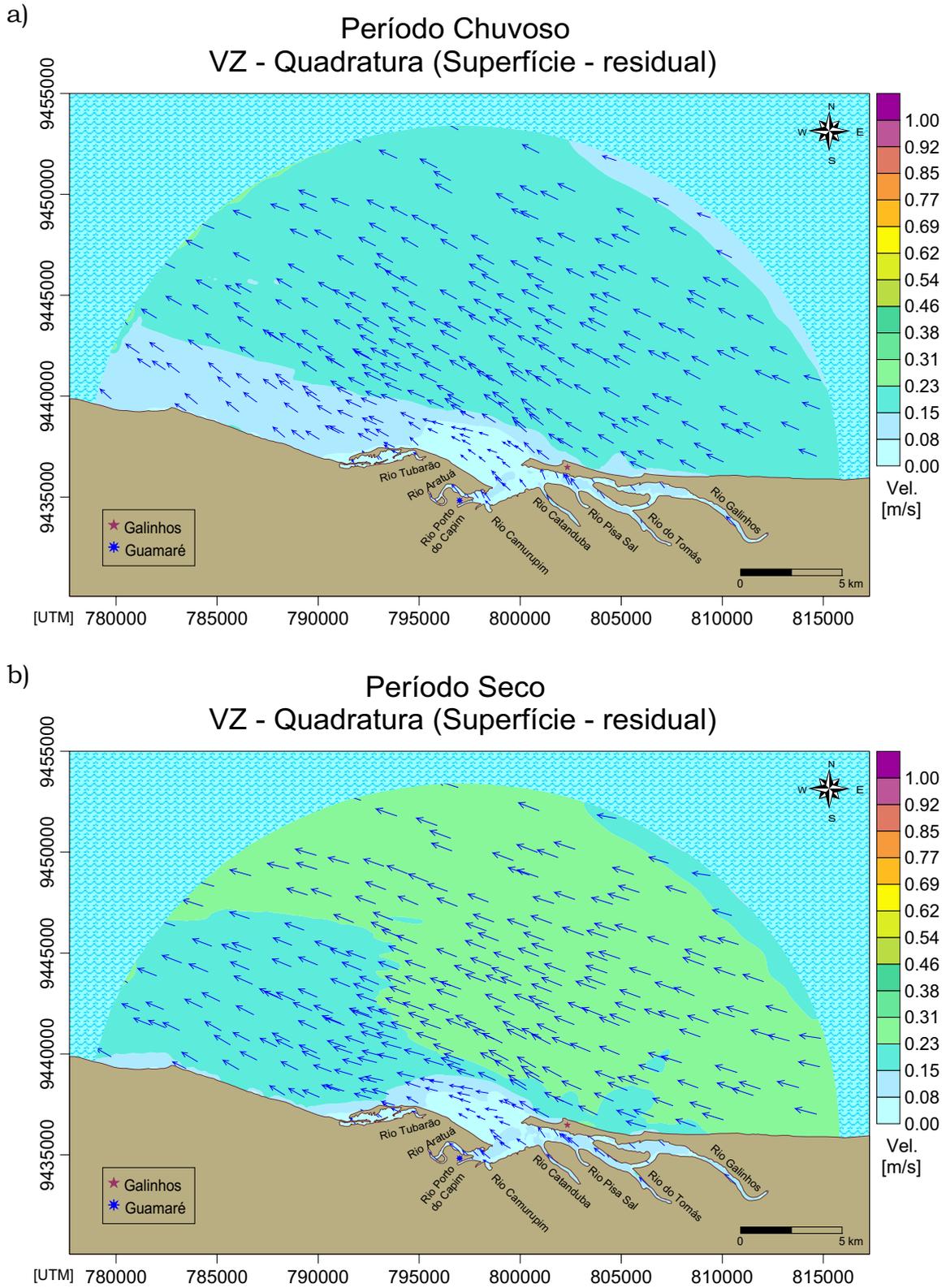


**Figura 5.39.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a preamar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

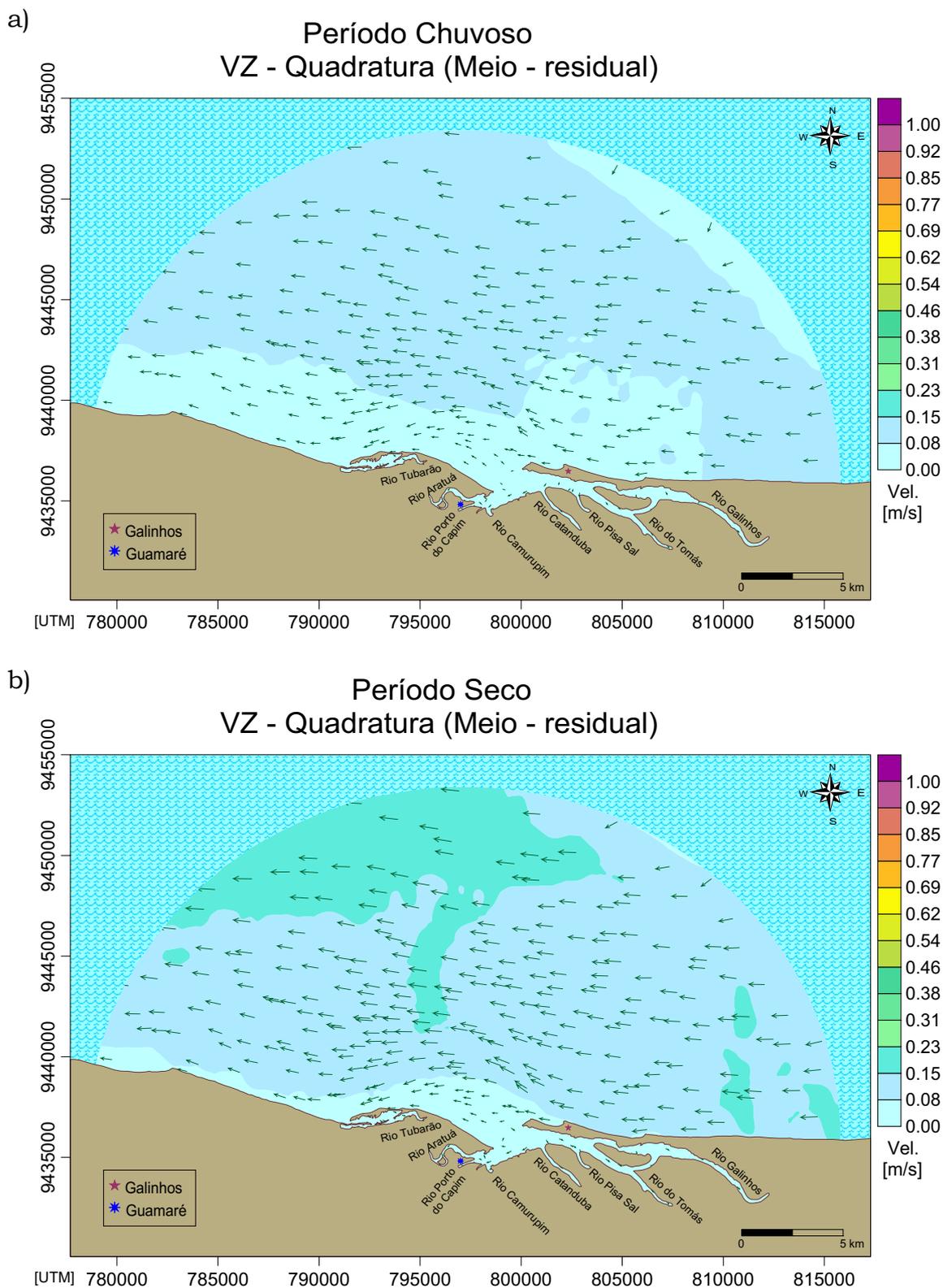
Durante a maré vazante, as correntes residuais superficiais (Figura 5.40) exibiram intensidades menores no período chuvoso, quando comparadas com o período seco, com medianas de  $0,17 \text{ m.s}^{-1}$  e  $0,23 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente. A direção destas correntes prevaleceu para NO, no período chuvoso, e para O-NO, no período seco. Na região estuarina, a intensidade e a direção das correntes foram bastante semelhantes em ambos os períodos, com sentido predominante também para NO.

No período chuvoso, as correntes residuais de vazante no meio da coluna d'água (Figura 5.41) exibiram intensidades, aproximadamente, duas vezes menores do que as da superfície. Valores mais elevados de intensidade são encontrados no período seco, apesar destas terem se assemelhado com a época úmida de forma geral. Os vetores, no entanto, apontaram para a direção O nas duas épocas distintas. Dentro do estuário, as correntes são similares, com direção predominante para SE e formação de dois pequenos vórtices logo na entrada do mesmo.

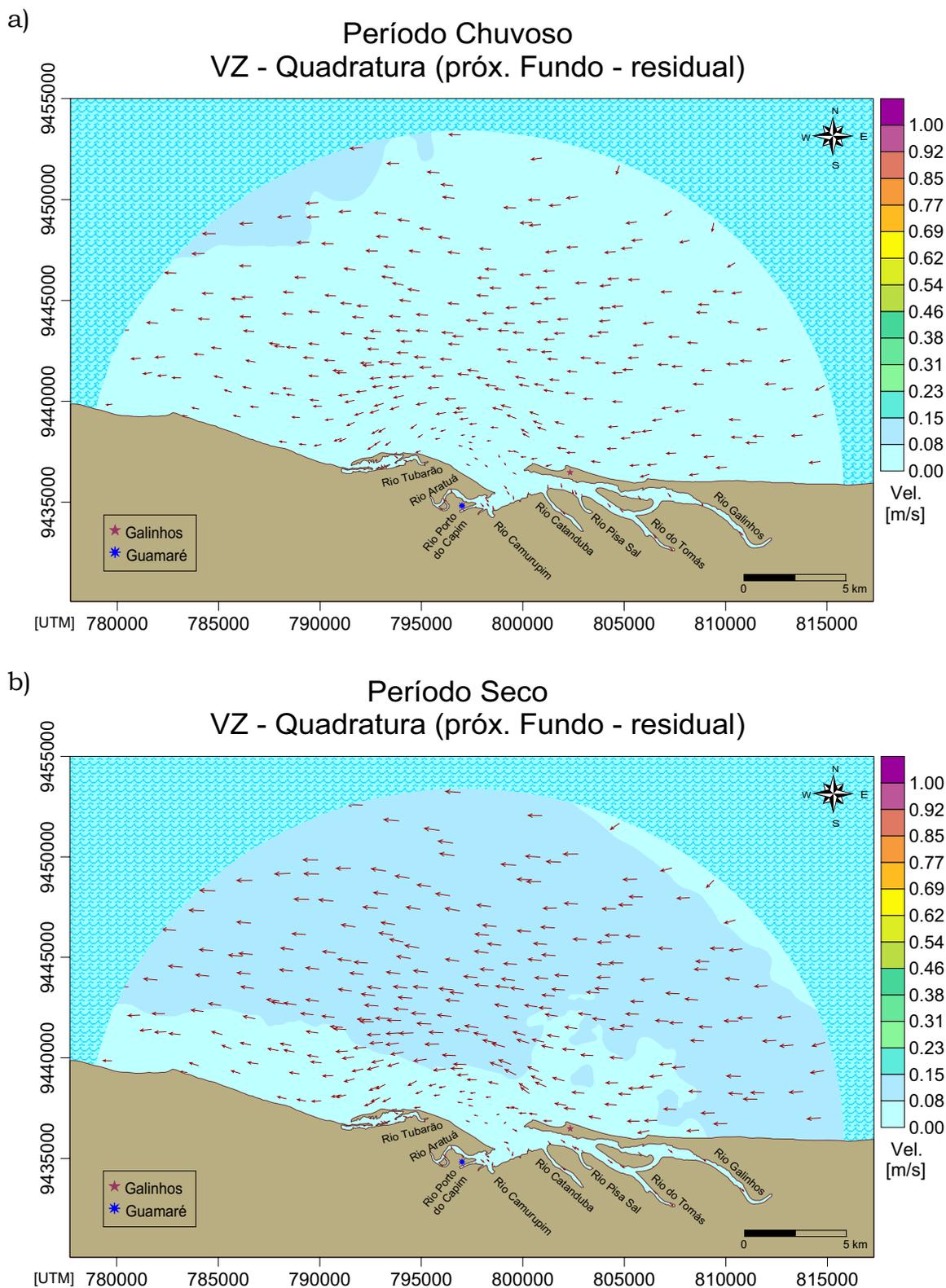
As correntes próximas ao fundo (Figura 5.42) se dirigiram com predominância para O em ambos os períodos, apesar de haver um leve fluxo para dentro do estuário se direcionando para S-SE. Quanto às intensidades destas correntes, estas apresentaram valores mais elevados durante o período seco, cuja mediana foi de  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo este valor de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$  no período úmido, o qual se mostrou mais uniforme.



**Figura 5.40.** Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.41.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

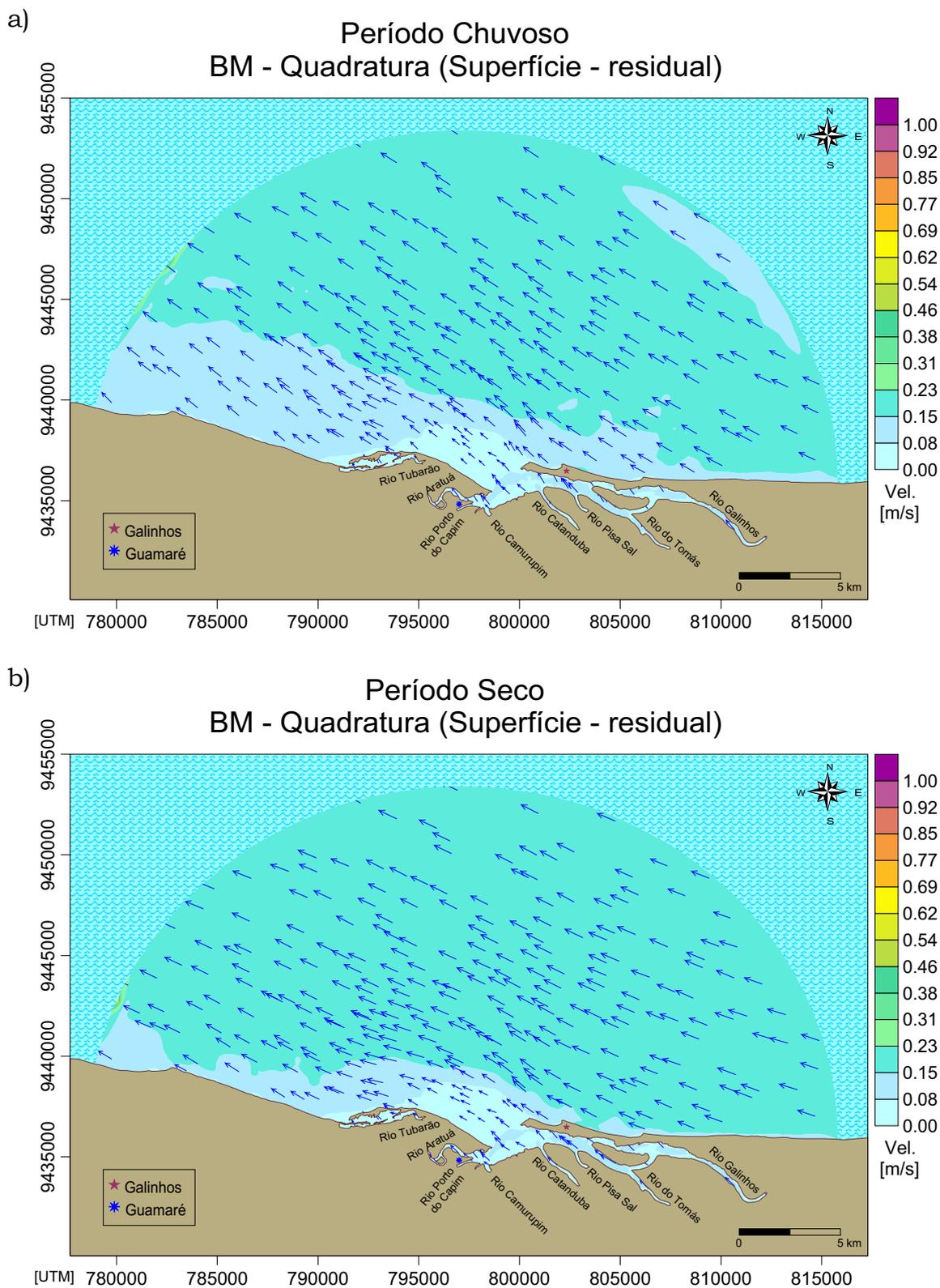


**Figura 5.42.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a vazante de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

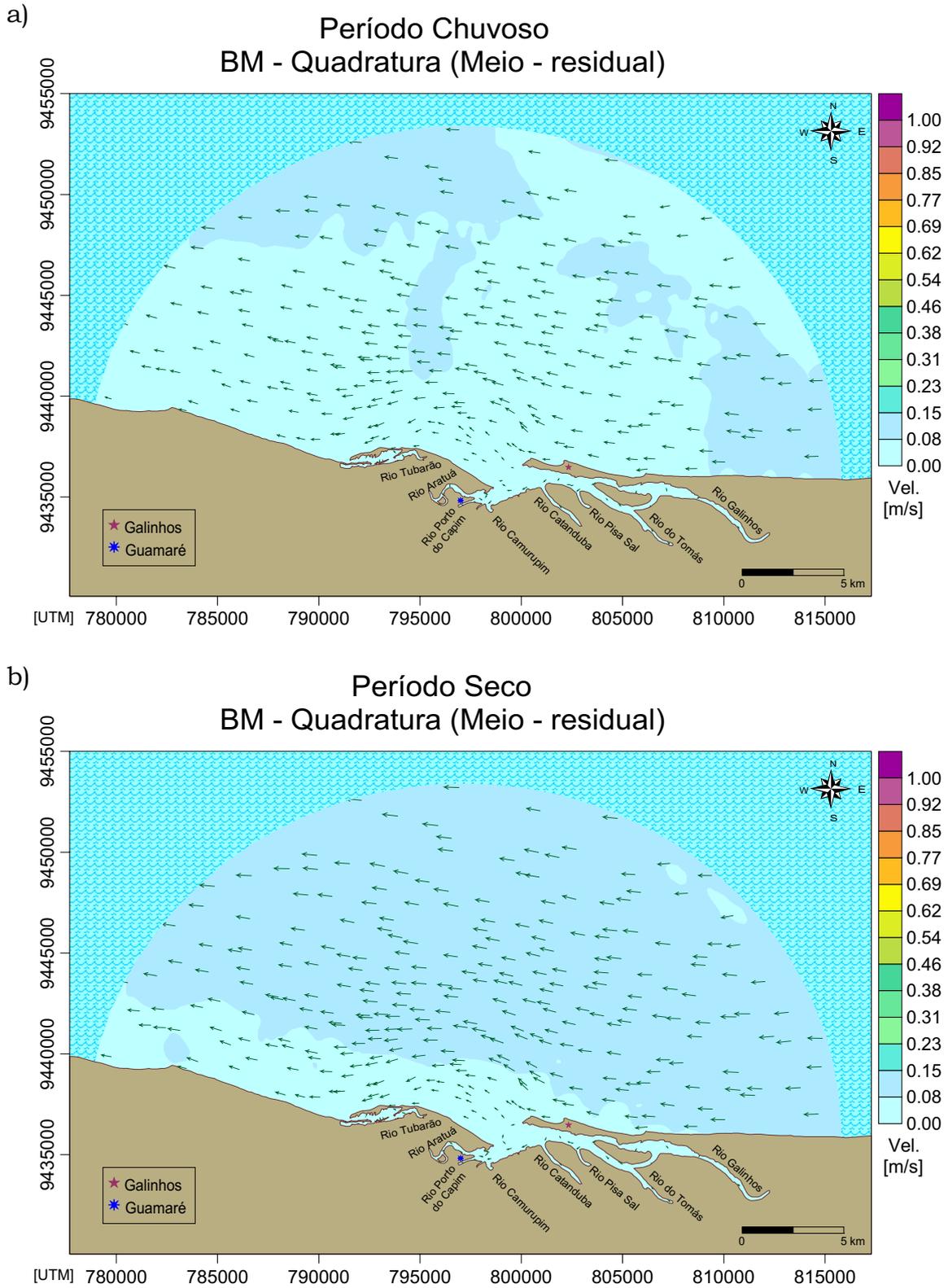
Nas correntes residuais superficiais da baixa-mar (Figura 5.43), a intensidade e a direção foram parecidas entre as duas estações do ano, com vetores direcionados para NO. A diferença entre as medianas foi de apenas  $0,03 \text{ m.s}^{-1}$  para a maior delas (período seco, com mediana de  $0,19 \text{ m.s}^{-1}$ ).

No meio da coluna d'água (Figura 5.44), as correntes residuais deste estágio apresentaram-se ligeiramente mais elevadas no período de estiagem (mediana de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ ), porém, com apenas  $0,02 \text{ m.s}^{-1}$  de diferença entre as medianas. A direção destas correntes apontou predominantemente para O durante as duas épocas sazonais. A área estuarina mostrou correntes com intensidades semelhantes entre os períodos e direções apontando para S-SE.

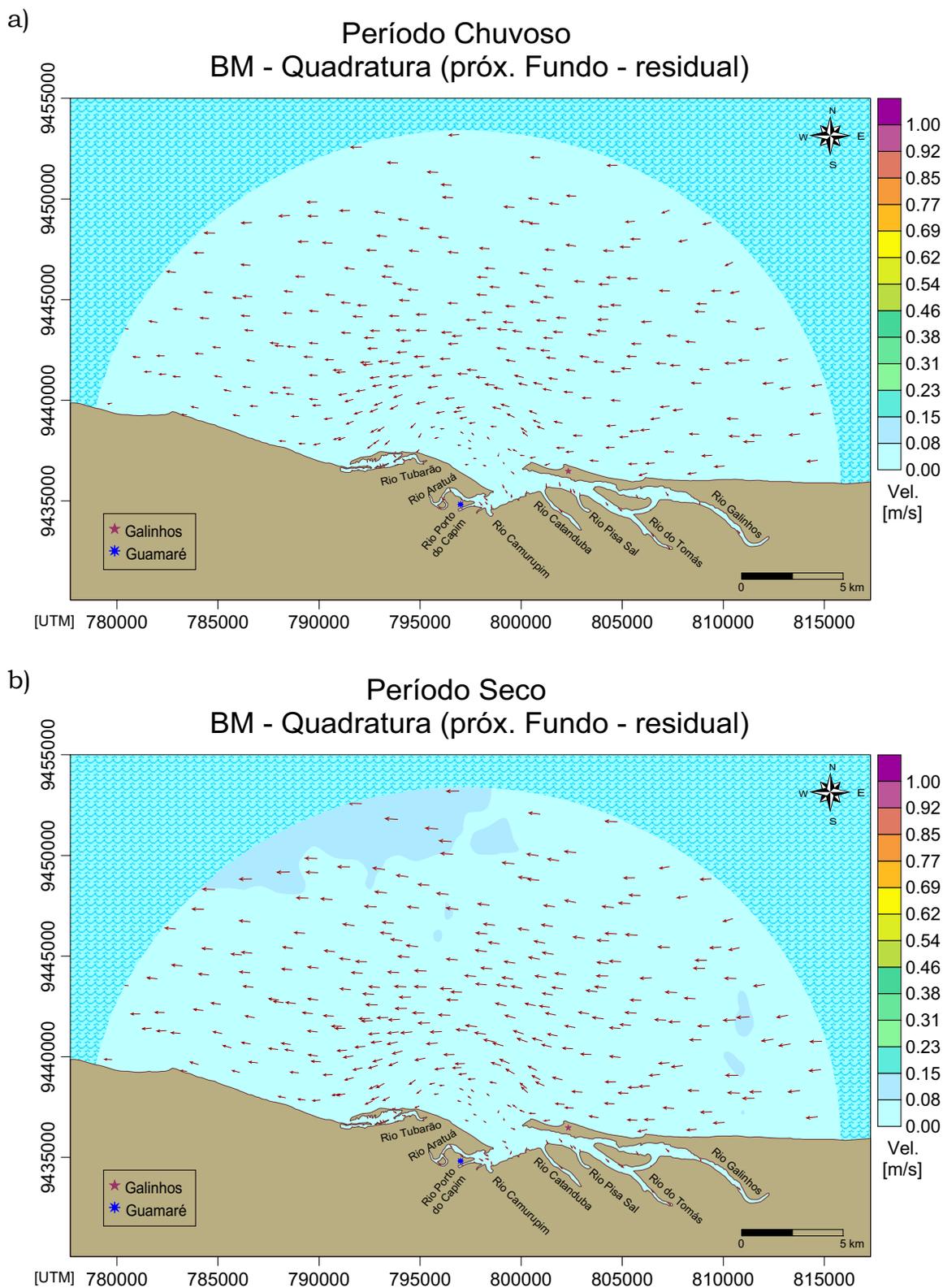
As correntes residuais de baixa-mar da camada próxima ao fundo (Figura 5.45) mostraram intensidades levemente mais altas durante o período seco (valor mediano de  $0,06 \text{ m.s}^{-1}$ ), principalmente na região norte-noroeste do domínio. No entanto, os vetores das correntes se dirigiram para O nos diferentes períodos sazonais. Próximo ao lado esquerdo da entrada do estuário observou-se uma área de divergência com correntes predominantes para S-SE dentro do estuário.



**Figura 5.43.** Valores residuais da velocidade das correntes na superfície da baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.



**Figura 5.44.** Valores residuais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água da baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

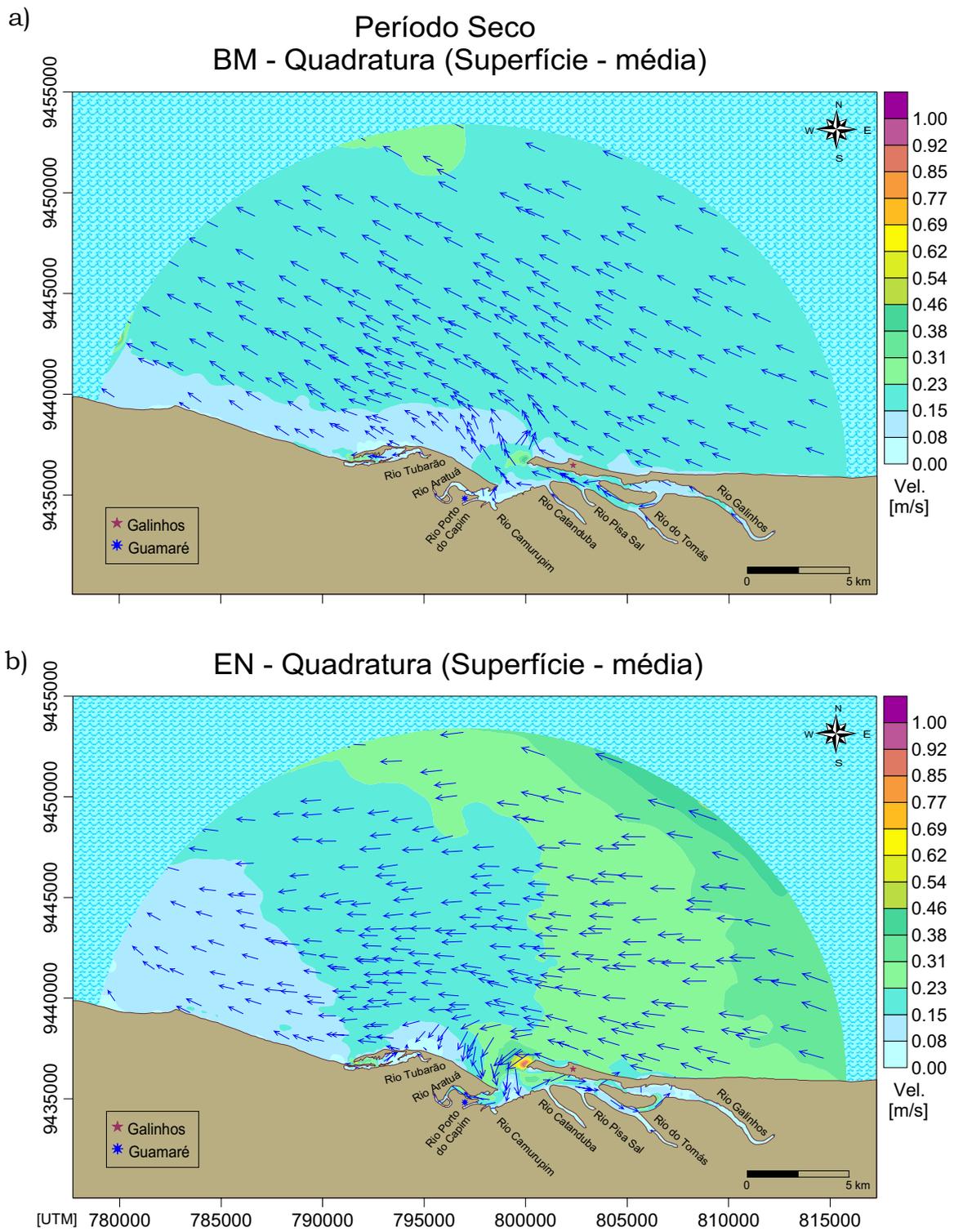


**Figura 5.45.** Valores residuais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar de quadratura para os períodos (a) chuvoso e (b) seco.

Observou-se no estágio de enchente da quadratura que as velocidades das correntes superficiais (Figura 5.46) foram maiores durante o período seco, onde o valor registrado da mediana foi de  $0,22 \text{ m.s}^{-1}$ , enquanto, na época chuvosa, a mediana foi de  $0,18 \text{ m.s}^{-1}$ . A direção dominante das correntes foi para NO, no período chuvoso, e para O-NO, no período seco.

A intensidade das correntes na metade da coluna d'água (Figura 5.47) se apresentou mais uniforme e mais baixa durante o período de chuva (mediana de  $0,06 \text{ m.s}^{-1}$ ), exceto a noroeste do domínio espacial onde ocorreram velocidades semelhantes às da época de estiagem. O fluxo das águas, no entanto, se dirigiu para O em ambas as épocas.

Nas correntes próximas do fundo (Figura 5.48), as intensidades e direções se apresentaram bem semelhantes em ambos os períodos (diferença das medianas de  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ ) e velocidades ligeiramente mais altas a noroeste da malha, principalmente no período seco (mediana de  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ ). Da mesma forma ocorreu com o fluxo das águas que se dirigiu predominantemente para O.



**Figura B.6.** Média da velocidade das correntes do período seco na superfície dos estágios de baixa-mar (a) e enchente (b) da quadratura.